

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA E
ENGENHARIA DE MATERIAIS**

Dorly Fernandes da Silva Junior

**EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E TÉRMICAS DO
CONCRETO CELULAR AUTOCLAVADO**

Dissertação submetida ao Programa de
Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção de Grau de
Mestre em Ciência e Engenharia de
Materiais

Orientador: Prof. Dr. Dachamir Hotza
Coorientador: Prof. Dr. Wellington
Repetto

Florianópolis

2011

Catálogo na fonte pela Biblioteca Universitária
da
Universidade Federal de Santa Catarina

S586e Silva Junior, Dorly Fernandes da

Efeito da composição química sobre as características
mecânicas e térmicas do concreto celular autoclavado
[dissertação] / Dorly Fernandes da Silva Junior ; orientador,
Dachamir Hotza. - Florianópolis, SC, 2011.

87 p.: il., grafs., tabs.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa
Catarina, Centro Tecnológico. Programa de Pós-Graduação em
Ciência e Engenharia de Materiais.

Inclui referências

1. Ciência dos materiais. 2. Engenharia de materiais.
3. Concreto. 4. Planejamento experimental. 5. Resistência de
materiais. I. Hotza, Dachamir. II. Universidade Federal de
Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Ciência e
Engenharia de Materiais. III. Título.

CDU 620.1

Dorly Fernandes da Silva Junior

**EFEITO DA COMPOSIÇÃO QUÍMICA SOBRE AS
CARACTERÍSTICAS MECÂNICAS E TÉRMICAS DO
CONCRETO CELULAR AUTOCLAVADO**

Esta Dissertação foi julgada adequada para obtenção do Título de Mestre em Ciência e Engenharia de Materiais e aprovada em sua forma final pelo Programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais - PGMAT

Florianópolis, 31 de Outubro de 2011.

Prof. Dr. Carlos A. S. de Oliveira
Coordenador do Programa

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Dachamir Hotza
Orientador/ UFSC

Prof., Dr. Wellington Repette
Coorientador/ UFSC

Prof. Dr. Antonio Pedro Novaes de Oliveira
Membro interno/ UFSC

Prof. Dr. Carlos Renato Rambo
Membro interno/ UFSC

Prof. Dr. Fernando Pelisser
Membro externo/ UNESC

Este trabalho é dedicado a minha
esposa Adriana e aos meus filhos
Laura e Pedro.

AGRADECIMENTOS

A minha esposa Adriana, pela paciência e motivação;

Ao meu orientador Prof. Dachamir e ao meu coorientador Prof. Wellington pela orientação e suporte;

À empresa CELUCON, em especial ao engenheiro Eduardo Candinho dos Santos, sempre presente nas discussões técnicas e fundamental na obtenção de todas as amostras utilizadas neste trabalho;

Aos estudantes de engenharia Saulo Gutierre, Daniel Santos e Alencar Milioli, sempre dispostos a ajudar;

Ao laboratório físico-químico da Whirlpool Eletrodomésticos, em especial ao técnico de laboratório Wolmir Effting, por disponibilizar os equipamentos necessários para os testes de compressão, condutividade térmica e densidade aparente;

Ao laboratório de materiais da Embraco, em especial ao técnico de laboratório Antonio Tadeu Cristofolini, por disponibilizar o MEV para as minhas análises;

A Whirlpool NAR, em especial a engenheira Judith Ruiz pelas micrografias feitas no MEV da unidade nos Estados Unidos da América;

Ao marceneiro Roberto, por disponibilizar seus equipamentos para os cortes das amostras;

Ao LABMAT da UFSC, em especial ao técnico Diego Salvaro pelos serviços de picnometria de gás hélio;

Aos membros da banca avaliadora;

Aos professores do programa de Pós-Graduação em Ciência e Engenharia de Materiais;

Ao secretário do PGMAT, Rogério Campos, pelo suporte nas questões burocráticas.

RESUMO

O concreto celular pode ser entendido como uma espuma cerâmica de poros fechados, fabricada a partir da aeração de uma pasta aquosa de cimento Portland, contendo ou não agregados miúdos, através da incorporação química ou mecânica de um agente formador de poros. Isolamento térmico e acústico, leveza e alta resistência ao fogo são algumas das propriedades que tornam este material muito atrativo para a área de construção civil, onde atualmente é aplicado na substituição de tijolos de alvenarias convencionais. Este projeto ratifica, por meio de planejamentos experimentais (DOE) e outras ferramentas estatísticas, o fator percentual de alumínio como o mais importante para a variação das variáveis respostas densidade, resistência à compressão e coeficiente de condutividade térmica do concreto celular autoclavado. Outros fatores avaliados nos experimentos foram percentuais de vermiculita e de cal e concentração de cimento. Equações lineares que representam as relações entre densidade e resistência à compressão e densidade e coeficiente de condutividade térmica também foram obtidas e propostas neste trabalho. A necessidade de se entender quais outros potenciais de uso do concreto celular na indústria, como por exemplo, isolantes em fornos residenciais e industriais, foi o grande motivador deste estudo.

Palavras-chave: Concreto Celular Autoclavado, DOE, Resistência Mecânica, Condutividade Térmica

ABSTRACT

Cellular concrete is a ceramic foam with closed porous, produced from the aeration of the Portland cement, containing or not small aggregates, via inclusion of a chemical or a mechanical porous agent former. Thermal and acoustic insulation, low weight and high fire resistance are properties that become this material very attractive for building construction applications. This project confirms, thus design of experiments (DOE) and other statistical tools, that the aluminum percentage is the most important factor to the responses density, mechanical strength and thermal conductivity coefficient for the autoclaved cellular concrete. The other factors evaluated in this study were the vermiculite, lime and cement concentrations. Moreover, this project delivers linear equations that correlate density and mechanical strength and density and thermal conductivity coefficient. The need for understanding the potential use of this technology in other industrial areas, like, for example, insulation in home appliances or industrial ovens, was the main motivation of this study.

Keywords: Autoclaved Cellular Concrete, DOE, Mechanical Strength, Thermal Conductivity

ÍNDICE

1	INTRODUÇÃO.....	17
1.1	PROBLEMA E JUSTIFICATIVA	17
1.2	OBJETIVOS.....	18
1.2.1	Objetivo Geral.....	18
1.2.2	Objetivos Específicos	18
2	CONCRETO CELULAR	19
2.1	HISTÓRIA	19
2.2	DEFINIÇÕES, PROPRIEDADES GERAIS E APLICAÇÕES.....	19
2.3	NOMENCLATURA.....	20
2.4	CLASSIFICAÇÃO	21
2.5	MICROESTRUTURA.....	24
3	FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS.....	29
3.1	CARTAS DE CONTROLE	29
3.1.1	Causas Comuns e Causas Especiais	29
3.1.2	Subgrupos Racionais	29
3.1.3	Carta de Controle da Média e da Amplitude	30
3.2	PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS.....	32
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	36
4.1	MATERIAIS	36
4.1.1	Pó de alumínio.....	36
4.1.2	Cal	36
4.1.3	Cimento portland.....	36
4.1.4	Vermiculita.....	36
4.1.5	Areia.....	36
4.2	MÉTODOS.....	37
4.2.1	Avaliação de variação no processo de produção	37
4.2.2	Primeiro Planejamento Experimental (DOE1)	37
4.2.3	Segundo Planejamento Experimental (DOE2).....	40
4.2.4	Caracterização do produto	42
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	46
5.1	AVALIAÇÃO DE VARIAÇÃO NO PROCESSO DE PRODUÇÃO ..	46
5.1.1	Microscopia eletrônica de varredura (MEV)	54
5.1.2	Composição Química.....	55
5.2	DOE1.....	55
5.2.1	Densidade	55
5.2.2	Resistência à compressão	57
5.2.3	Condutividade térmica	59
5.2.4	Microscopia eletrônica de varredura	60
5.3	DOE2.....	62
5.3.1	Densidade	63
5.3.2	Resistência à compressão	64
5.3.3	Condutividade térmica	66

5.3.4	Modelo reduzido	68
5.3.5	Relação entre características mecânicas e térmicas.....	70
5.3.6	Microscopia eletrônica de varredura	74
5.3.7	Porosidade.....	83
6	CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS	86
7	REFERÊNCIAS.....	88

LISTA DE FIGURAS

Figura 2.1 – Cristais de tobermorita que crescem nos espaços vazios (células). (escala 3 μm e 5 μm)	26
Figura 2.2 – Microestruturas da matriz de dois concretos celulares de mesma composição, curados através de diferentes métodos. (a) CCBT, (b) CCA. (Fonte: Narayanan e Ramamuthy [5]).	27
Figura 3.1 – Quatro subgrupos selecionados de um Processo Estável Idealizado	30
Figura 3.2 – Quatro subgrupos selecionados de um Processo Instável	30
Figura 3.3 – Exemplo de carta \bar{X} R	32
Figura 4.1 – Árvore de amostragem utilizada para avaliação da variação no processo de produção de CCA	37
Figura 4.2 – Árvore do experimento para DOE1	40
Figura 4.3 – Árvore do experimento para DOE2	42
Figura 4.4 – Fotografia mostrando as amostras utilizadas na medição do coeficiente de condutividade térmica	43
Figura 4.5 – Fotografia mostrando o equipamento utilizado para medição do coeficiente de condutividade térmica.....	43
Figura 4.6 – Fotografia mostrando um exemplo de amostra utilizada no ensaio de compressão	44
Figura 4.7 – Exemplo de amostra utilizada na microscopia eletrônica de varredura	45
Figura 5.1 – Variação de densidade encontrada processo de produção do CCA	46
Figura 5.2 – Variação da condutividade térmica encontrada processo de produção do CCA.....	46
Figura 5.3 – Variação da resistência à compressão encontrada processo de produção do CCA.....	47
Figura 5.4 – Variação da resistência a compressão com a densidade de concretos celulares curadas sob baixas temperaturas.	50
Figura 5.5 – Variação da condutividade térmica com a densidade de concretos celulares curadas sob baixas temperaturas.	50
Figura 5.6 – Carta \bar{X} R para densidade.....	51
Figura 5.7 – Carta \bar{X} R para condutividade térmica	52
Figura 5.8 – Carta \bar{X} R para resistência à compressão	53
Figura 5.9 – Micrografias (MEV) de duas amostras originadas da avaliação de variação da linha de produção de CCA (aumento de 14x).....	54
Figura 5.10 – Micrografia (MEV) de uma amostra retirada da avaliação de variação da linha de produção de CCA (aumento de 1019x)	55

Figura 5.11 – Variação encontrada para densidade no DOE1	56
Figura 5.12 Gráfico de pareto e normal mostrando os fatores encontrados como significativos para a densidade no DOE1	57
Figura 5.13 Variação encontrada para a resistência à compressão no DOE1	58
Figura 5.14 Nenhum fator apareceu como significativo para resistência a compressão no DOE1	58
Figura 5.15 – Curva do teste de compressão amostra 2 (maior valor encontrado no DOE1)	59
Figura 5.16 – Variação encontrada para valores de coeficiente de condutividade térmica no DOE1	59
Figura 5.17 – Nenhum fator aparece como significativo para a variável resposta coeficiente de condutividade térmica.....	60
Figura 5.18 – Micrografia (MEV) mostrando: a) Amostra com a maior densidade encontrada no DOE1; b) Amostra com a menor densidade encontrada no DOE1	61
Figura 5.19 – Micrografia mostrando os cristais de tobermorita encontrados na amostra que apresentou o menor valor de densidade no DOE1. (aumento 1600x).....	62
Figura 5.20 – Variação nos valores de densidade gerada no DOE2	63
Figura 5.21 – Fatores significativos para a variável resposta densidade encontrados no DOE2	64
Figura 5.22 – Fatores significativos para a variável resposta densidade encontrados no DOE2	65
Figura 5.23 – Fatores significativos para a variável resposta densidade encontrados no DOE2	65
Figura 5.24 – Curvas de compressão e deformação para as amostras enumeradas de 1 a 8.....	66
Figura 5.25 – Curvas de compressão e deformação para as amostras enumeradas de 9 a 16.....	66
Figura 5.26 – Variação nos valores de condutividade térmica gerada no DOE2	67
Figura 5.27 – Percentual de Alumínio aparece como único fator significativo para a variável resposta coeficiente de condutividade térmica	68
Figura 5.28 – Representação gráfica do modelo reduzido para a variável resposta densidade, tendo como valor de R^2 igual a 0,79	68
Figura 5.29 – Representação gráfica do modelo reduzido para a variável resposta compressão, tendo como valor de R^2 igual a 0,67	69

Figura 5.30 – Representação gráfica do modelo reduzido para a variável resposta condutividade térmica, tendo como valor de R^2 igual a 0,72..	70
Figura 5.31 – Relação linear entre densidade e coeficiente de condutividade térmica	71
Figura 5.32 – Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação (R^2) do modelo proposto para a relação entre densidade e condutividade térmica	72
Figura 5.33 – Relação linear entre densidade e resistência à compressão	73
Figura 5.34 – Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação (R^2) do modelo proposto para a relação entre densidade e resistência à compressão	73
Figura 5.35 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 1 e 2. Na amostra 1, tamanhos de poros de 274 a 558 μm . Na amostra 2, tamanhos de poros de 113 a 385 μm	75
Figura 5.36 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 3 e 4. Na amostra 3, tamanhos de poros de 171 a 488 μm . Na amostra 4, tamanhos de poros de 167 a 759 μm	76
Figura 5.37 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 9 e 10. Na amostra 9, tamanhos de poros de 266 a 1120 μm . Na amostra 10, tamanhos de poros de 247 a 895 μm	77
Figura 5.38 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 11 e 12. Na amostra 11, tamanhos de poros de 320 a 1126 μm . Na amostra 12, tamanhos de poros de 217 a 798 μm	78
Figura 5.39 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 5 e 6. Na amostra 5, tamanhos de poros de 118 a 904 μm . Na amostra 6, tamanhos de poros de 511 a 1500 μm	79
Figura 5.40 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 7 e 8. Na amostra 7, tamanhos de poros de 119 a 853 μm . Na amostra 8, tamanhos de poros de 690 a 1800 μm	80
Figura 5.41 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 13 e 14. Na amostra 13, tamanhos de poros de 255 a 866 μm . Na amostra 14, tamanhos de poros de 373 a 659 μm	81
Figura 5.42 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 15 e 16. Na amostra 15, tamanhos de poros de 236 a 851 μm . Na amostra 16, tamanhos de poros de 857 a 1060 μm	82
Figura 5.43 – Curvas de porosidade e densidade aparente obtidas no DOE2.....	85

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Fatores para construção das cartas de controle \bar{X} R para tamanhos de subgrupo (n) com valores de 2 a 5 (fonte Montgomery and Runger 2002 [14]).....	32
Tabela 2 – Especificação do pó de alumínio utilizado para obtenção de todas as amostras deste trabalho.	36
Tabela 3 - Fatores e seus limites inferior e superior usados no DOE1. Os percentuais representados nesta tabela são percentuais em massa.....	39
Tabela 4 - Fatores e seus limites inferior e superior usados no DOE2 (percentuais em massa)	41
Tabela 5 – Classificação do CCA de acordo com suas características mecânicas [19]	47
Tabela 6 – Propriedades do CCA. Diferentes valores de resistência à compressão e condutividade térmica para diferentes valores de densidade [21].....	48
Tabela 7 - Componentes químicos e seus respectivos percentuais em massa encontrados em uma das amostras	55
Tabela 8 – Valores de condutividade térmica, resistência a compressão e densidade encontrados no segundo experimento planejado (DOE2)....	62
Tabela 9 – Condutividade térmica da argamassa de cimento e do ar (fonte Incropera, Dewitt, Bergman, Lavine [33])	71
Tabela 10 – Média dos percentuais em massa de cada componente químico encontrado e valores mínimo e máximo de tamanhos de poros em μm de cada amostra obtida no DOE2	83
Tabela 11 – Densidade do sólido, densidade aparente, densidade relativa e porosidade das amostras obtidas no DOE2	84

1 INTRODUÇÃO

1.1 PROBLEMA E JUSTIFICATIVA

O concreto celular pode ser entendido como uma espuma cerâmica de poros fechados, fabricada a partir da aeração de uma pasta de cimento Portland e água, contendo ou não agregados finos, através da incorporação química ou mecânica de um agente formador de poros [1].

Por ser um material a base de cimento, a cura do concreto celular ocorre devido a reações de hidratação a temperaturas relativamente baixas, quando comparado aos materiais cerâmicos convencionais, fabricados por sinterização [1].

O concreto celular é amplamente utilizado na área de construção civil, na forma de blocos ou painéis pré-formados para a fabricação de paredes e divisórias com propriedades de isolamento acústico e térmico, conferidas ao material devido à sua estrutura de poros fechados [2]. Outras aplicações se encontram na área de preenchimento geotécnico e de minas, sendo que, neste caso, o material é curado *in loco* [3]. Outras vantagens apresentadas pelo concreto celular são suas resistências ao fogo e à absorção de água, além de sua capacidade de absorver ondas de energia [3,4].

Existem várias formas possíveis de se fabricar um concreto celular. Diferentes composições podem ser aliadas a diferentes métodos de cura, a fim de obter variadas propriedades finais, tais como densidade, resistência mecânica e condutividade térmica [1].

As propriedades finais de um concreto celular dependem fortemente de sua porosidade, a qual pode ser variada alterando-se o teor do agente formador de poros utilizado. Um material altamente poroso irá apresentar excelentes propriedades de isolamento térmico e acústico, devido à grande quantidade de ar confinado no mesmo. Contudo, estas propriedades são alcançadas em detrimento da resistência mecânica do material, a qual diminui com o aumento do volume de poros [1].

A caracterização da porosidade e de sua influência na resistência mecânica do concreto celular se torna, portanto, um fator muito importante na fabricação deste tipo de material. O ideal é aliar uma boa resistência mecânica com níveis consideráveis de isolamento térmico e acústico.

A literatura [5] mostra ainda que, para uma mesma composição e porosidade, a resistência do concreto celular pode ser aumentada alterando-se o método de cura do mesmo. Os concretos celulares

autoclavados, curados sob pressão de vapor da água a temperaturas entre 180 e 190 °C, apresentam, em geral, resistência à compressão superior à dos concretos celulares curados a temperatura ambiente. Além disso, durante a cura em autoclave o material já adquire sua microestrutura final, sendo que os curados em baixa temperatura sofrem alterações microestruturais ao longo do tempo e, conseqüentemente, mudanças lentas e gradativas em sua resistência mecânica.

1.2 OBJETIVOS

1.2.1 Objetivo Geral

Investigar e entender a relação entre densidade, resistência mecânica e capacidade de isolamento térmico de concretos celulares autoclavados, variando teores de Alumínio, Vermiculita, Cal e Concentração de Cimento, componentes estes, comumente utilizados e controlados na fabricação de concretos celulares.

1.2.2 Objetivos Específicos

- Medir qual é a média e a variação de valores, relacionados a propriedades mecânicas e térmicas do material, encontrados em peças de concreto celular autoclavado produzidas em uma linha de produção real;
- Determinar qual a importância de fatores relacionados às matérias-primas, comumente utilizadas na fabricação do concreto celular, nas propriedades mecânicas e térmicas do concreto celular autoclavado;
- Obter a relação entre densidade, resistência à compressão e coeficiente de condutividade térmica de um concreto celular autoclavado.

2 CONCRETO CELULAR

2.1 História

O concreto celular foi descoberto na Suécia, por volta do ano de 1914, quando se observou que uma mistura composta por cimento, cal e água podia ser expandida adicionando-se alumínio em pó. Verificou-se que o material resultante, uma massa cimentícia aerada, apresentava um comportamento semelhante ao da madeira, podendo, por exemplo, ser cortado, serrado, lixado e furado, mas com a vantagem de não apresentar a combustibilidade inerente aos materiais orgânicos [2]. Este material foi então aprimorado, e em 1920 começou a ser produzido comercialmente na Europa. No ano de 1995, mais de 31 milhões de metros cúbicos de concreto celular foram produzidos por cerca de 50 fábricas em todo o mundo [6,7].

2.2 Definições, Propriedades Gerais e Aplicações

O concreto celular é um material constituído basicamente por uma matriz cimentícia, na qual bolhas de ar isoladas e homogeneamente distribuídas são introduzidas através de uma reação química pela adição de pós metálicos, tais como Al e Zn, ou mecanicamente, por meio da adição de agentes espumantes [3,5,8,9].

A alta porosidade apresentada pelo concreto celular, aproximadamente 80% em volume, o torna um material muito leve, com densidades variando entre 300 e 1800 kg/m³, em comparação aos 2300 kg/m³ apresentados pelo concreto tradicional [10,9]. Além disso, sua estrutura de poros fechados garante excelente grau de isolamento térmico e acústico, além de boa resistência à absorção de água [10,11]. Outra grande vantagem é sua resistência ao fogo, conferida por sua composição completamente inorgânica [3,11]. Entretanto, todas essas propriedades são obtidas em detrimento da resistência mecânica do material, a qual diminui com o aumento da porosidade do mesmo [1]. Como os valores de densidade dos concretos celulares são bastante variados, a melhor composição e o processo de fabricação mais apropriado devem ser adotados, a fim de se obter o material mais adequado para uma aplicação específica, seja ela estrutural ou de preenchimento e/ou isolamento. Isto significa que, ao escolher um tipo de concreto celular para uma determinada aplicação, esta escolha deve ser baseada em um dos três requisitos inter-relacionados: peso

(densidade), grau de isolamento térmico ou acústico e resistência mecânica [9,11].

O concreto celular é amplamente utilizado na área de construção civil, na forma de blocos pré-formados para a confecção de paredes e divisórias, as quais apresentam as propriedades mencionadas anteriormente [2]. É muito conhecido por ser um material ecologicamente correto, visto que necessita de apenas uma pequena fração da energia despendida na fabricação dos materiais de alvenaria convencionais, tais como os tijolos cerâmicos, para a sua produção. Além disso, o consumo de matérias-primas para a sua fabricação é bastante baixo, considerando-se a quantidade de produto final produzido [10].

O concreto celular pode ainda ser curado in loco, quando utilizado como material de preenchimento geotécnico ou de minas [3]. Neste caso, uma espuma com a consistência de um creme de barbear é adicionada e misturada a uma pasta de cimento Portland no próprio local da aplicação [4]. Este tipo de concreto celular é utilizado também no final de pistas de aeroportos e autovias, como forma de deter o movimento de veículos fora de controle, devido à sua capacidade de absorver energia e ondas de impacto [3,4].

Por ter como matéria-prima básica um cimento Portland, o concreto celular apresenta, em relação aos materiais cerâmicos celulares convencionais, a vantagem de ser produzido a uma temperatura consideravelmente baixa, através de uma reação química de hidratação [1].

2.3 Nomenclatura

Segundo Grutzeck, in Scheffler e Colombo [1], o concreto celular não pode, por definição, ser considerado um concreto. Ele é apenas uma pasta endurecida, composta basicamente por cimento e água, que foi aerada antes da cura para a obtenção de uma estrutura celular homogênea. Um concreto convencional é, entretanto, definido como uma pasta de cimento e água, à qual são adicionados agregados miúdos (areia) e graúdos (brita). Assim, ao concreto celular foi dado este nome apenas para facilitar sua inserção e aceitação no mercado, e lembrar que ele é também um produto a base de cimento Portland.

Alguns autores defendem que o ar pode ser considerado um agregado deste material de baixa densidade. Narayanan e Ramamurthy [5], através de uma análise de microscopia eletrônica de varredura

(MEV), comprovaram a existência de uma região de transição na interface poro-matriz de um concreto celular, análoga às regiões existentes na interface agregado-matriz de um concreto convencional. Assim, os poros de um concreto celular podem ser considerados como agregados de densidade zero, os quais agem como inclusões na matriz cimentícia, formando um material compósito.

2.4 Classificação

Existem várias formas pelas quais o concreto celular pode ser produzido. Diferentes composições, aliadas a diferentes métodos de processamento podem ser utilizadas, a fim de variar as propriedades finais do material. Segundo Narayanan e Ramamurthy [9], os concretos celulares podem ser classificados da seguinte forma:

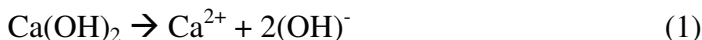
2.1.4.1 Método de formação de poros

- Incorporação química de ar (concreto gasoso):

Neste caso, um agente químico é adicionado e misturado a uma pasta aquosa de cimento, quando esta ainda se encontra no estado plástico, isto é, antes do seu endurecimento por reação hidrotérmica. A função deste agente é reagir com a pasta cimentícia para a liberação de algum tipo de gás, o qual fica confinado no material na forma de bolhas gasosas, resultando, após a cura do cimento, em uma estrutura celular.

Vários materiais podem ser utilizados com este fim: pó de alumínio, magnésio ou zinco reagem com a pasta cimentícia liberando gás hidrogênio (H_2). Peróxido de hidrogênio (H_2O_2), quando usado em conjunto com hipoclorito de sódio, reage liberando oxigênio (O_2). Compostos de nitrogênio e amônia (NH_3) liberam nitrogênio (N_2), e carbeto de cálcio produz acetileno gasoso [12]. Dentre estes, o pó de alumínio é o agente mais comumente utilizado. Sua eficiência no processo de formação de bolhas depende de sua pureza, do tamanho de suas partículas, da alcalinidade do cimento, bem como dos meios para prever o escape do gás de H_2 antes do endurecimento do material. Para o caso de cimentos com baixa alcalinidade, hidróxido de cálcio ($Ca(OH)_2$), cal ou hidróxido de sódio ($NaOH$) são adicionados para garantir o meio básico necessário para a reação, além de assegurar que todo o alumínio reaja [9,12].

A reação entre o pó de alumínio e a pasta cimentícia pode ser explicada da seguinte forma [10]: inicialmente, o hidróxido de cálcio liberado durante a hidratação do cimento dissolve-se no meio aquoso:



Num segundo estágio, o alumínio reage com o meio básico e a água, liberando hidrogênio gasoso que, devido à viscosidade da pasta, fica confinado no material na forma de poros:



O pH do meio para que esta reação ocorra deve ser de aproximadamente 12,5 [10].

- Espumação (concreto espumado):

Neste método, a introdução de poros é feita através da mistura mecânica de uma espuma pré-formada (agente espumante previamente misturado à parte da água de mistura) ou de um agente espumante adicionado diretamente à pasta cimentícia. Este é um meio bastante econômico e que possibilita grande controle da formação de poros no material, já que não envolve reações químicas. Dentre os agentes espumantes utilizados estão os detergentes, sabões, resinas e proteínas hidrolisadas, tal como a queratina [9]. Este método é geralmente utilizado para a produção de concretos celulares curados in loco [4].

Existem ainda casos em que os dois métodos acima descritos são utilizados simultaneamente.

2.1.4.2 Método de cura

A temperatura de cura exerce um grande efeito nas propriedades finais apresentadas por um concreto celular, visto que esta interfere nas reações de hidratação do material a base de cimento. Segundo Grutzeck, Scheffler e Colombo [1], se uma linha divisória de temperatura, a aproximadamente 100 °C, for adotada, os concretos celulares podem ser divididos em dois grupos, de acordo com o método de cura: os curados a baixa temperatura e os autoclavados.

- Concreto Celular Curado a Baixa Temperatura (CCBT)

Este método de cura é utilizado predominantemente para concretos celulares curados in loco, quando utilizados em aplicações geotécnicas e de preenchimento, embora também seja aplicado na fabricação de blocos pré-formados para a construção civil, neste caso em menor escala [1].

O CCBT consiste basicamente numa pasta cimentícia, a qual é aerada através da adição e mistura de algum agente formador de bolhas, e curada a uma temperatura próxima a 25 °C [1]. No caso da fabricação de blocos pré-formados, estes são mantidos por 28 dias em um ambiente com umidade relativa de aproximadamente 90% [10].

- Concreto Celular Autoclavado (CCA)

Este método de cura é utilizado na fabricação de blocos e painéis pré-formados para aplicações em construção civil. Neste caso, o material composto por uma pasta cimentícia aerada é curado numa autoclave que opera ao longo da curva líquido-vapor da água, a temperaturas entre 180 e 190 °C, por um período de 10 a 12 h [1].

A composição utilizada para a fabricação deste tipo de concreto celular é bastante diferente da usada no CCBT e geralmente enriquecida com até 50% em massa de algum material rico em sílica (SiO_2), sendo o quartzo (areia) e a cinza volante (classe F) os mais comumente utilizados. Esta adição de sílica é feita, pois foi repetidamente observado que uma pasta cimentícia convencional curada a temperaturas maiores que 100 °C desenvolve fases muito fracas de silicato de cálcio hidratado [1]. Entretanto, aumentando a quantidade de sílica, obtém-se uma composição que possibilita a formação de uma fase mais forte, chamada tobermorita ($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), durante a cura em autoclave [1,5].

O principal agente formador de bolhas utilizado neste tipo de material é o pó de alumínio, o qual é adicionado à pasta no minuto final da mistura. A pasta cimentícia para a produção do CCA é, em geral, muito menos viscosa que a do CCBT. Contudo, com a adição do pó metálico em questão, a viscosidade do material aumenta devido à liberação do gás H_2 e ao decorrente surgimento de uma estrutura celular [1].

Logo após a mistura do alumínio, a pasta é vazada num grande molde cúbico de aproximadamente 1,5 m³, onde ocorre o processo de expansão devido à formação do H_2 e inicia-se o processo de hidratação

do cimento. Após 45 a 60 min., a pasta adquire certa resistência a verde, suficiente para ser cortada em blocos com o auxílio de fios metálicos. Os blocos são então autoclavados a temperaturas entre 180 e 190 °C, sob pressão de vapor da água, durante 10 a 12 h [1].

Segundo Narayanan e Ramamurthy [5], enquanto o CCBT sofre mudanças microestruturais ao longo do tempo, o CCA atinge sua estrutura final durante o tratamento em autoclave, estando assim pronto para o uso logo após a autoclavagem.

2.5 Microestrutura

A microestrutura de um concreto celular é composta basicamente por duas fases: uma fase gasosa e uma matriz sólida. A fase gasosa é composta por bolhas dispersas (aproximadamente 60% em volume), incorporadas ao material quando este ainda se encontra na forma de uma pasta aquosa, e por vazios e microporos (aproximadamente 20% em volume) resultantes da evaporação de água após a cura do cimento. A composição da matriz depende muito das matérias-primas utilizadas, mas constitui-se predominantemente de silicatos de cálcio hidratados, formados por fenômenos de dissolução/precipitação que ocorrem durante a reação do cimento Portland com a água. Durante esta reação formam-se ainda outros compostos, mas em menores quantidades, tais como o aluminato de cálcio hidratado e o hidróxido de cálcio [1].

2.1.5.1 Fase gasosa

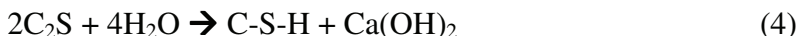
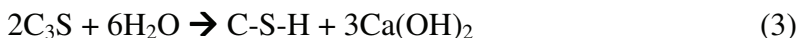
Durante a reação de hidratação, parte da água se liga química ou fisicamente aos hidratos formados, através de pontes de hidrogênio ou forças eletrostáticas. Esta água é considerada não-evaporável e necessita de temperaturas maiores que 105 °C para ser removida da estrutura. A água em excesso, entretanto, permanece em cavidades intersticiais e vazios entre os hidratos e silicatos formados, e evapora a temperatura ambiente ou pouco superior, deixando microporos na matriz. A porosidade total de um concreto celular é, portanto, a soma do volume de macroporos (formados devido à expansão da pasta cimentícia pela adição de um agente espumante) e do volume de microporos, deixados pela água evaporada [9,1].

A quantidade de poros formados no material depende da quantidade de agente formador de bolhas utilizado. Para uma mesma composição, maiores quantidades deste agente resultam, em geral, em

um maior volume de poros e conseqüente menor densidade do concreto celular. Como a densidade deste material é proporcional à sua resistência mecânica, a quantidade de agente formador de poros deve ser definida com base nas propriedades requeridas para o produto final.

2.1.5.2 Matriz

A matriz que circunda os poros e microporos de um concreto celular é composta predominantemente por silicatos de cálcio hidratados. A nomenclatura desses compostos é usualmente abreviada na forma “C-S-H” (Calcium Silicate Hydrate), onde o C, o S e o H representam respectivamente os óxidos de cálcio (CaO), de silício (SiO₂) e a água (H₂O). Os hífen são usados para indicar que a composição dos silicatos formados durante a reação de hidratação do cimento é bastante variável e extremamente dependente das matérias-primas utilizadas na fabricação do material [1]. De maneira bastante simplificada, as reações de hidratação do cimento para a formação dos compostos C-S-H ocorrem da seguinte forma:



Onde o C₃S representa o silicato tricálcio (Ca₃SiO₅) e o C₂S reapresenta o silicato dicálcio (Ca₂SiO₄), principais componentes do cimento Portland [1].

Os compostos C-S-H, formados durante a hidratação do cimento, comportam-se muito mais como uma solução sólida do que como um composto de estequiometria definida. Isto significa que se o C-S-H fosse, por exemplo, representado num diagrama de fases para o sistema CaO-SiO₂-H₂O a 25 °C, este ocuparia um grande campo, com variadas composições, ao invés de se localizar num único ponto [1].

Segundo Grutzeck, in Scheffler e Colombo [1], a estrutura C-S-H formada em concretos celulares curados a baixa temperatura é essencialmente amorfa e por isso difícil de ser estudada através de métodos de caracterização de materiais cristalinos, tal como a difratometria de raios X (DRX).

Durante a autoclavagem do CCA, entretanto, a estrutura C-S-H tende a se cristalizar e, se a razão molar Ca/Si for de aproximadamente

0,8, formar a tobermorita, um silicato de cálcio hidratado de composição estequiométrica $5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$, o qual confere maior resistência mecânica ao CCA, quando comparado ao CCBT.

Narayanan e Ramamurthy [5] investigaram a microestrutura e os compostos formados durante a cura de concretos celulares autoclavados e curados a baixa temperatura, contendo areia ou cinza volante. Eles comprovaram que o tipo de cura empregado na fabricação de concretos celulares, bem como a fonte de sílica utilizada (areia ou cinza volante) influencia consideravelmente nos produtos formados durante a reação de hidratação, bem como na microestrutura e propriedades finais do material. Para o caso do CCBT analisado, observaram-se mudanças microestruturais ao longo do tempo, sendo que o CCA atingiu sua microestrutura final após 8 h de tratamento em autoclave. Além disso, o CCA apresentou uma estrutura muito mais cristalina que o CCBT, composta por cristais de tobermorita ($5\text{CaO} \cdot 6\text{SiO}_2 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$) interconectados, o que conferiu maior resistência mecânica a este material. A figura 2.1 apresenta os cristais de tobermorita encontrados na microestrutura do concreto celular. A figura 2.2 apresenta imagens de MEV da microestrutura da matriz de dois concretos celulares de mesma composição, evidenciando as diferenças decorrentes do tipo de cura aplicado.

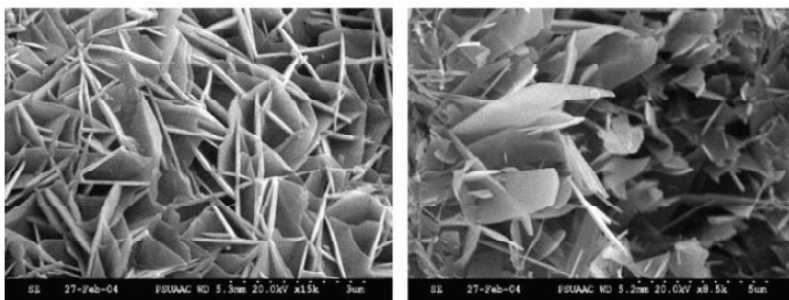


Figura 2.1 – Cristais de tobermorita que crescem nos espaços vazios (células). (escala 3 μm e 5 μm)

(Fonte: Scheffler e Colombo [1])

Dependendo das matérias-primas utilizadas, existem ainda outros compostos que se formam durante a cura do cimento, porém em quantidades bem inferiores. Os aluminatos de cálcio hidratados, que se formam e coexistem com o C-S-H, são cristalinos a todas as temperaturas e por isso mais fáceis de serem estudados pelas técnicas de DRX e MEV. Os principais são o $\text{Ca}_2\text{Al}_2\text{O}_5 \cdot 8\text{H}_2\text{O}$, o $\text{Ca}_4\text{Al}_6\text{O}_7 \cdot 13\text{H}_2\text{O}$ e

o $\text{Ca}_3\text{Al}_2\text{O}_6 \cdot 6\text{H}_2\text{O}$. Outra fase muito comum que se forma ao final da reação de hidratação do cimento é a portlandita $\text{Ca}(\text{OH})_2$, a qual é um subproduto da decomposição e formação do C-S-H a partir do silicato tricálcio (Ca_3SiO_5) e do silicato dicálcio (Ca_2SiO_4). É comum ainda a formação dos compostos monosulfoaluminato de cálcio (AFm) e trissulfoaluminato de cálcio (AFt) [1].

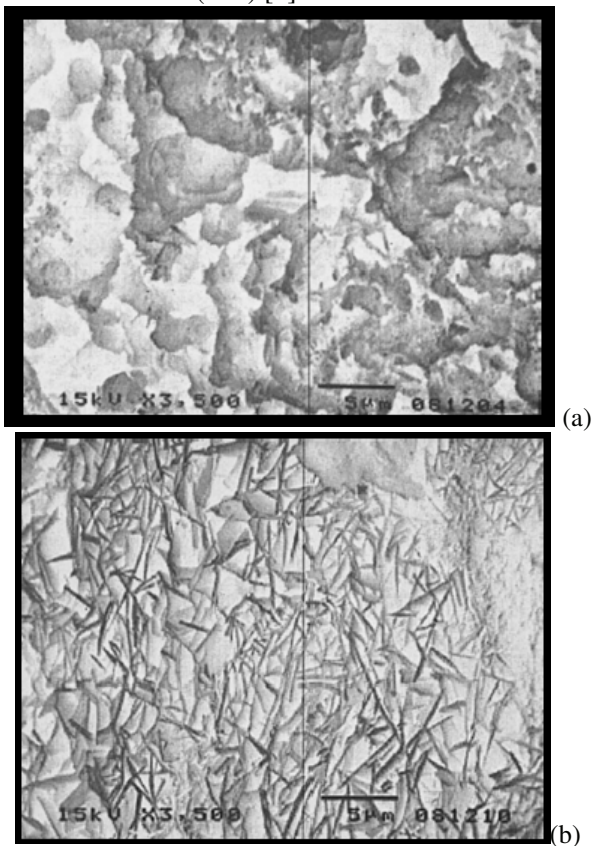


Figura 2.2 – Microestruturas da matriz de dois concretos celulares de mesma composição, curados através de diferentes métodos. (a) CCBT, (b) CCA. (Fonte: Narayanan e Ramamuthy [5]).

3 FERRAMENTAS ESTATÍSTICAS

3.1 CARTAS DE CONTROLE

Cartas de controle são ferramentas que induzem problemas do mundo real ao processo. Quando a predição é viável e apropriada, as cartas de controle servem de base para as predições. Quando o processo está fora de controle, as cartas irão servir para alertar sobre a instabilidade. Segundo Shewhart, a definição de controle estatístico é: “Um fenômeno será dito como controlado quando, através do uso da experiência passada, conseguimos prever, ao menos dentro dos limites, como o fenômeno irá se comportar no futuro”. [13]

3.1.1 Causas Comuns e Causas Especiais

Em todo e qualquer processo de produção, independentemente do quão bem projetado e controlado ele seja, existe sempre uma variação natural. Esta variação natural é resultante do acúmulo de muitos pequenos efeitos, essencialmente causados por causas inevitáveis. Quando esta variação é relativamente pequena, usualmente a consideramos como um nível de desempenho de processo aceitável. No ramo da estatística, este nível aceitável de variação é chamado de “sistema estável de causas comuns”. Um processo que apresenta somente causas comuns é considerado sob controle estatístico. [14]

Outros tipos de variação podem ocasionalmente estar presentes num processo de produção. Esses outros tipos de variação são considerados “causas especiais” e geralmente são causados por ajustes desapropriados em máquinas da produção, erro de operadores ou defeitos em um lote da matéria prima. Um processo que trabalha na presença de causas especiais é considerado um processo fora de controle. [14]

3.1.2 Subgrupos Racionais

Uma idéia fundamental no uso de cartas de controle é a coleta de amostras de acordo com o que Shewhart chamou de subgrupo racional. Os subgrupos devem ser coletados de tal maneira que todas as variações naturais, variações originadas de causas comuns, estejam presentes. Dessa forma, toda variação originada de causas especiais será

representada por pontos fora dos limites de controle das cartas de controle. [14]

Na figura 3.1 há uma ilustração de quatro subgrupos selecionados em um processo estável idealizado. Já na figura 3.2, tem-se a ilustração de quatro subgrupos selecionados em um processo instável.

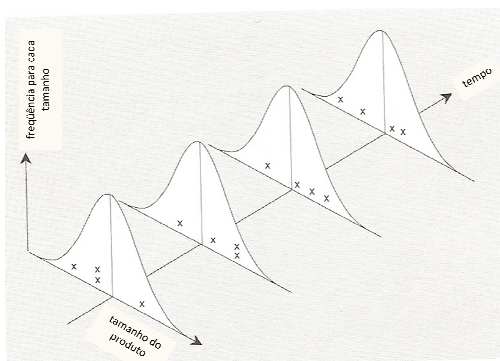


Figura 3.1 – Quatro subgrupos selecionados de um Processo Estável Idealizado
(Fonte: Wheeler e Chambers 1992 [13])

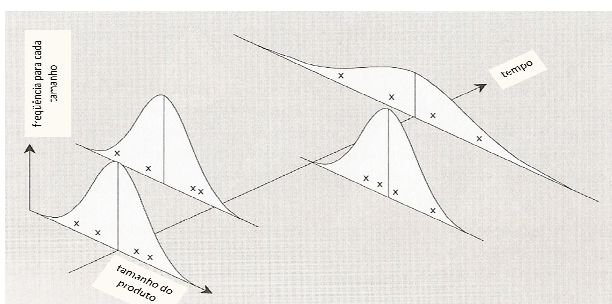


Figura 3.2 – Quatro subgrupos selecionados de um Processo Instável
(Fonte: Wheeler e Chambers 1992 [13])

3.1.3 Carta de Controle da Média e da Amplitude

Com o uso dos subgrupos racionais de Shewhart, duas variáveis adicionais foram introduzidas: o subgrupo das médias e o subgrupo da

amplitude. De fato, os processos atualmente são controlados por essas duas variáveis. [13]

Para construir a carta R, é necessário calcular a amplitude média do processo, que é dada pela seguinte fórmula:

$$\bar{R} = \frac{R_0 + R_1 + R_2 + \dots + R_{n-1} + R_n}{n - 1} \quad (5)$$

Onde:

n – número de subgrupos

R – cada valor de amplitude móvel

Após calcular a amplitude média do processo, se faz necessário calcular o limite inferior e superior e a linha central da carta R:

$$UCL = D_4 * \bar{r} \quad CL = \bar{r} \quad LCL = D_3 * \bar{r} \quad (6)$$

Onde:

UCL – limite superior da carta de R

\bar{r} – média das amplitudes

CL – linha central da carta R

LCL – limite inferior da carta R

D₄ e D₃ – valores tabelados para diferentes tamanhos de amostras (tabela 1)

Para construir a carta \bar{X} , é necessário calcular a média do processo, que é dada pela média das médias dos subgrupos (\bar{x}).

$$UCL = \bar{x} + A_2 \bar{r} \quad CL = \bar{x} \quad LCL = \bar{x} - A_2 \bar{r} \quad (7)$$

Onde:

UCL – limite superior da carta \bar{X}

\bar{r} – média das amplitudes

CL – linha central da carta R

LCL – limite inferior da carta \bar{X}

A₂ – valores tabelados para diferentes tamanhos de amostras (tabela 1)

\bar{x} – média das médias dos subgrupos

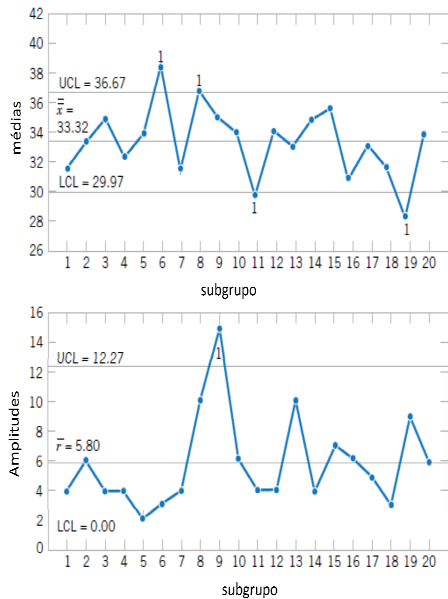


Figura 3.3 – Exemplo de carta \bar{X} R
(Fonte: Montgomery e Runger 2002 [14])

Tabela 1 - Fatores para construção das cartas de controle \bar{X} R para tamanhos de subgrupo (n) com valores de 2 a 5 (fonte Montgomery and Runger 2002 [14])

N	Carta \bar{X}			Carta R	
	A_1	A_2	A_3	D_3	D_4
2	3,760	1,880	1,128	0	3,267
3	2,394	1,023	1,693	0	2,575
4	1,880	0,729	2,059	0	2,282
5	1,596	0,577	2,326	0	2,115

3.2 PLANEJAMENTO DE EXPERIMENTOS

Métodos estatísticos têm um importante papel no planejamento, na condução, na análise e na interpretação de dados gerados em experimentos de engenharia. Quando muitos fatores têm influência em

certo tipo de produto, a melhor estratégia é a do planejamento dos experimentos (*Design of Experiments, DOE*). [15,16]

Em um DOE o engenheiro frequentemente faz mudanças deliberadamente nos fatores de entrada e determina como a resposta do experimento é afetada por tais mudanças. Alguns fatores têm forte influência, outros têm média influência e alguns têm nenhuma influência na variável resposta. [16]

DOE envolve uma seqüência de atividades:

- Hipóteses – premissas e suposições que motivam o experimento
- Experimento – série de testes para investigar as hipóteses
- Análise – envolve o entendimento da natureza dos dados e o uso de análises estatísticas dos dados coletados
- Interpretação – entendimento dos resultados da análise experimental
- Conclusão – verificação se as hipóteses são verdadeiras ou falsas. Muito frequentemente, testes adicionais são necessários para testar as hipóteses e algumas vezes novas hipóteses são geradas as quais requerem mais experimentos. [16]

Uma técnica amplamente empregada de planejamento experimental são os experimentos fatoriais, que podem ser completos ou fracionados.

Um experimento fatorial completo consiste em avaliar todas as possíveis combinações dos níveis de todos os fatores. O número total de experimentos para um estudo com um número “k” de fatores com dois níveis é igual a 2^k . O uso do experimento fatorial completo é particularmente útil nos primeiros estágios do trabalho experimental, especialmente quando o número de fatores é menor ou igual a quatro. [16]

Alternativamente, pode-se empregar um experimento fatorial fracionado, quando a falta de tempo e/ou recursos tornam inviável um experimento fatorial completo. Assume-se então que as interações de ordem maior (terceira ordem e acima) não são importantes. Sendo assim, os efeitos de cada fator individualmente e suas interações de segunda ordem podem ser obtidas via um experimento de fatorial fracionado. Este experimento é representado por 2^{k-p} , onde k é o número de fatores e $\frac{1}{2} p$ representa a fração do fatorial completo. [16]

4 MATERIAIS E MÉTODOS

Todas as amostras utilizadas neste trabalho foram produzidas pela empresa de concreto celular chamada Celucon, localizada em Morro da Fumaça, SC. Por motivos de confidencialidade, todos os parâmetros de processo e seus métodos de controle não estão presentes neste documento.

4.1 MATERIAIS

4.1.1 Pó de alumínio

O pó de alumínio utilizado foi o Stanlux Flake CL4010, produzido pela empresa Aldoro, localizada em Rio Claro, SP.

Tabela 2 – Especificação do pó de alumínio utilizado para obtenção de todas as amostras deste trabalho.

Granulometria	
>325 Mesh (%máximo)	Tamanho Médio (μm)
3,0	16,0

4.1.2 Cal

A Cal (CaO) utilizada foi a cal virgem calcítica micropulverizada, de nome comercial LEVICAL, produzida pela empresa ICAL, Indústria de Calcinação Ltda., localizada em São José da Lapa, MG.

4.1.3 Cimento portland

O cimento Portland utilizado foi o CPV-ARI RS, da Votorantim Cimentos.

4.1.4 Vermiculita

A vermiculita utilizada é proveniente da Unimin do Brasil LTDA, Pernambuco.

4.1.5 Areia

A areia foi obtida da empresa Eloir Maccari, localizada em Morro da Fumaça, SC.

4.2 MÉTODOS

4.2.1 Avaliação de variação no processo de produção

Com o objetivo de entender qual a variação existente em um processo de produção de concreto celular autoclavado, uma estratégia de amostragem foi planejada e executada, conforme mostrado na figura 4.1.

Todas as amostras foram coletadas na linha de produção da empresa Celucon, a qual se encontra na cidade de Morro da Fumaça, na região Sul de Santa Catarina.

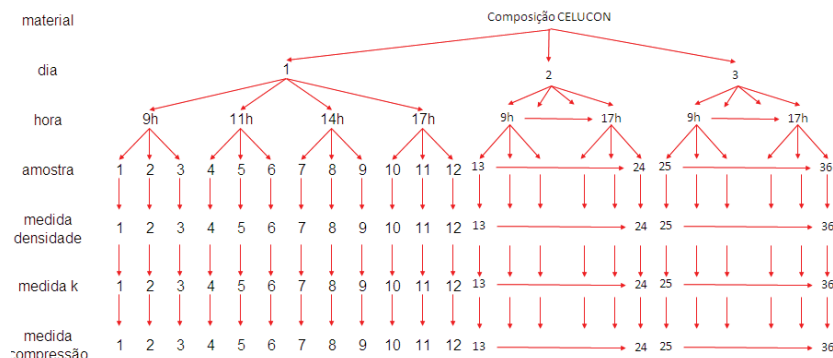


Figura 4.1 – Árvore de amostragem utilizada para avaliação da variação no processo de produção de CCA

O tamanho do subgrupo amostra é igual a três.

As variáveis respostas utilizadas são densidade, coeficiente de condutividade térmica e resistência à compressão. Tais variáveis são discutidas nos itens 5.2.4, 5.2.5 e 5.2.6.

Por questões de sigilo industrial, informações relacionadas à composição química e a outros parâmetros de processo não foram divulgadas nesta dissertação.

Todas as amostras analisadas foram autoclavadas.

4.2.2 Primeiro Planejamento Experimental (DOE1)

Discussões técnicas foram realizadas em conjunto com a engenharia da Celucon, onde fatores e seus níveis foram determinados. Para tal determinação de fatores e seus limites, levou-se em consideração a necessidade de se obter uma variação maior nos valores das variáveis respostas encontradas na linha de produção diária, avaliada no item 4.2.1, e a viabilidade técnica de rodar o experimento dentro da empresa em questão.

4.2.2.1 Fatores avaliados

- Percentual em massa de Alumínio
 - Teoria – alumínio tem a função de reagir com a pasta cimentícia para a liberação de gás hidrogênio (H_2), o qual fica confinado no material, na forma de bolhas gasosas, resultando, após a cura do cimento, em uma estrutura celular.
 - Previsão – é esperado que seja o fator mais significativo, pois é o gerador de células no concreto celular. Quanto mais alumínio, menor será a sua densidade, maior será a sua capacidade de isolamento térmica e menor será sua resistência mecânica
- Percentual em massa de Cal (CaO)
 - Teoria – cal é utilizada para o aumento da alcalinidade do cimento, melhorando a eficiência do alumínio na formação de bolhas gasosas
 - Previsão – como efeito principal, não ser importante para as variáveis respostas estudadas neste estudo, porém é possível que haja uma interação de segunda ordem com o percentual de alumínio, pois deve melhorar a eficiência deste na formação de bolhas no concreto.
- Percentual em massa de Vermiculita
 - Teoria – a vermiculita é utilizada como um aditivo para melhorar a capacidade de isolamento térmico do cimento e para aumentar a resistência a altas temperaturas
 - Previsão – como efeito principal, espera-se que os tratamentos com o maior percentual de vermiculita apresentem os menores coeficientes de condutividade térmica. Efeitos significativos, nas características mecânicas devido ao percentual de Vermiculita, não são esperados.

- **Concentração de Cimento**

- Teoria – Aumentando a concentração de cimento, conseqüentemente a relação entre água e sólido diminui.
- Previsão – estima-se que uma maior concentração de cimento deva aumentar a resistência mecânica, aumentar a densidade e diminuir a capacidade de isolamento térmico do concreto celular

Além dos fatores listados acima, água e areia foram utilizados para completar a massa do concreto. Do percentual necessário para completar os 100% em massa do concreto, 50% é completado com água e os outros 50% é completado com areia. Areia e água foram considerados como ruído em todos os experimentos mostrados nesta dissertação.

4.2.2.2 Limites superior e inferior

Os limites, superior (+) e inferior (-), utilizados no primeiro DOE estão representados na tabela 3.

Tabela 3 - Fatores e seus limites inferior e superior usados no DOE1. Os percentuais representados nesta tabela são percentuais em massa.

Matéria Prima	% Mínimo (-)	% Máximo (+)
Vermiculita	0,00%	3,00%
Cal	4,00%	12,00%
Cimento	3,00%	11,00%
Alumínio	0,02%	0,08%

4.2.2.3 Características do experimento

Pela quantidade de amostras necessárias para se rodar um experimento fatorial completo, o que geraria uma alta complexidade dentro da empresa Celucon, decidiu-se rodar uma experimento fatorial fracionado 2^{4-1} , resolução IV, onde se tem confundimentos entre efeitos principais com as interações de terceira e entre as interações de segunda com interações de segunda ordem, como segue:

- $V*CAL = A*Cim$
- $A = V*CAL*Cim$
- $V = A*CAL*Cim$
- $V*Cim = A*CAL$
- $CAL = V*A*Cim$

- $Cim = V * A * CAL$
- $V * A = CAL * Cim$,
Sendo:
- V – percentual de vermiculita
- CAL – percentual de cal
- A – percentual de alumínio
- Cim – concentração de cimento

A figura 4.2 mostra a árvore do experimento utilizada no DOE1.

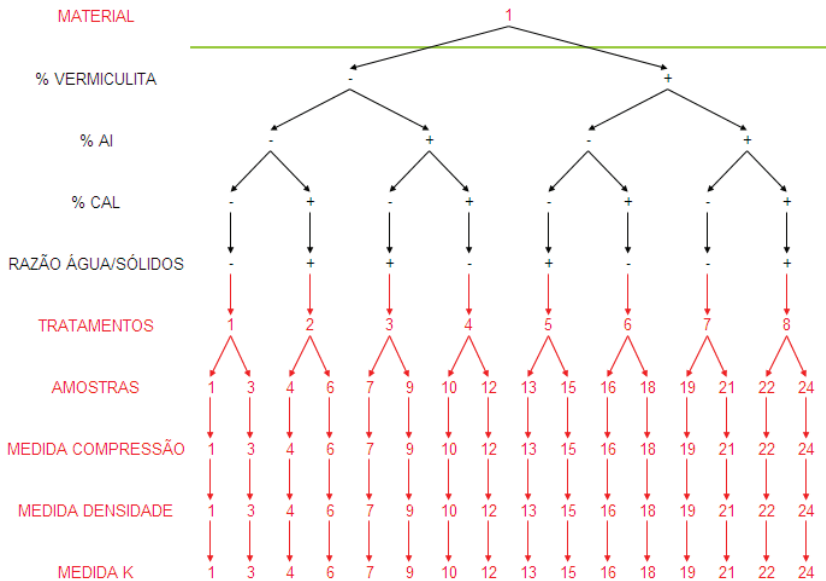


Figura 4.2 – Árvore do experimento para DOE1

4.2.3 Segundo Planejamento Experimental (DOE2)

Dúvidas geradas no DOE1 e a não existência de teorias que sustentem os resultados gerados por este motivaram a necessidade de se rodar um novo experimento.

4.2.3.1 Fatores avaliados

Os fatores avaliados no DOE2 foram os mesmos fatores avaliados no DOE1.

4.2.3.2 Limites superior e inferior

Com objetivo de melhorar a etapa de desmoldagem ocorrido no DOE1, os limites da concentração de cimento foram alterados, tendo um aumento nos valores de ambos os limites.

Para aumentar a o efeito principal do fator percentual de alumínio atingido no DOE1, o seu percentual teve um aumento pequeno no seu limite inferior, de 0,02% para 0,03% e um aumento mais significativo no seu limite superior, de 0,08% para 0,11%. A tabela 4 apresenta todos os valores dos limites utilizados para cada fator do experimento.

Tabela 4 - Fatores e seus limites inferior e superior usados no DOE2 (percentuais em massa)

Matéria Prima	% Mínimo (-)	% Máximo (+)
Vermiculita	0,00%	3,00%
Cal	4,00%	12,00%
Cimento	5,00%	14,00%
Alumínio	0,03%	0,11%

4.2.3.3 Características do experimento

O experimento utilizado foi um fatorial completo 2^4 . A figura 4.3 corresponde a árvore do experimento utilizada no DOE2.

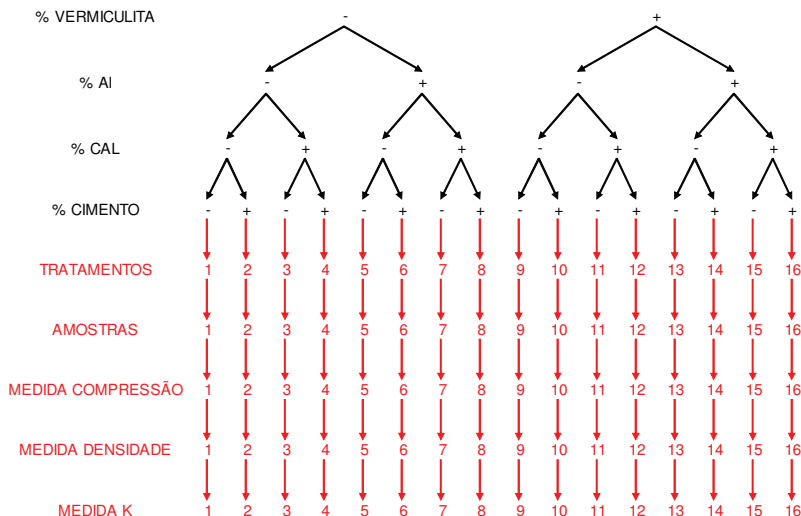


Figura 4.3 – Árvore do experimento para DOE2

4.2.4 Caracterização do produto

4.2.4.1 Densidade aparente a seco

A densidade das amostras foi medida segundo a norma ABNT NBR 13440, a qual regulamenta a verificação da densidade de massa aparente seca para blocos de concreto celular autoclavado. [17]

Cubos de 100 mm são retirados do centro de um bloco de concreto celular, secados em estufa a uma temperatura de 105 °C, até que a diferença entre duas pesagens sucessivas, efetuadas em um intervalo de 24 h seja menor ou igual a 1g. A densidade é dada pela razão entre a massa e o volume da amostra.

4.2.4.2 Condutividade térmica

Blocos com dimensões de 200 mm x 200 mm x 5 mm foram preparados para que as medições do coeficiente de condutividade térmica fossem realizadas. A figura 4.4 mostra as amostras usadas na medição do coeficiente de condutividade térmica.

O equipamento utilizado foi um Laser Comp FOX314, que se encontra no laboratório físico-químico da Whirlpool Eletrodomésticos SA, em Joinville, SC. A figura 4.5 ilustra o equipamento em questão.



Figura 4.4 – Fotografia mostrando as amostras utilizadas na medição do coeficiente de condutividade térmica



Figura 4.5 – Fotografia mostrando o equipamento utilizado para medição do coeficiente de condutividade térmica

4.2.4.3 Resistência à compressão

As medições de resistência à compressão foram realizadas segundo a norma ABNT NBR 13439 [18], a qual dita as condições de retirada de amostras de um bloco maior, parâmetros de secagem e de teste de compressão. A figura 4.6 apresenta um dos cubos de 100 mm utilizados nos ensaios de compressão.

O equipamento utilizado foi a máquina universal de ensaios mecânicos Instron 3369, localizada nas dependências do laboratório físico-químico da Whirlpool Eletrodomésticos SA, em Joinville SC.



Figura 4.6 – Fotografia mostrando um exemplo de amostra utilizada no ensaio de compressão

4.2.4.4 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

Amostras com geometria irregular, conforme ilustrado na figura 4.7, foram utilizadas para a microscopia eletrônica de varredura. Todas as amostras utilizadas não haviam sido ensaiadas mecanicamente.

As amostras provenientes da avaliação das variações inerentes ao processo (peças retiradas da linha de produção) e do DOE1 foram analisadas no microscópio eletrônico de varredura Philips XL30 presente no laboratório de materiais da Embraco, na cidade de Joinville SC. Para análises químicas a sonda EDS Noran Instruments, Voyager 603F-1SPS, presente neste mesmo laboratório.

As amostras provenientes do DOE2 foram examinadas no microscópio eletrônico de varredura Hitachi S-3400N, sob uma tensão de 20kV. Este microscópio eletrônico se encontra no laboratório de materiais da Whirlpool North America, na cidade de Benton Harbor, estado do Michigan, nos Estados Unidos da América. Foi realizada uma análise dos componentes químicos presentes em três áreas de cada amostra e o resultado foi dado em percentual em massa de cada componente presente. Para a avaliação de porosidade, uma área de cada amostra foi escolhida e os poros presentes nesta área foram medidos.



Figura 4.7 – Exemplo de amostra utilizada na microscopia eletrônica de varredura

4.2.4.5 Densidade relativa e porosidade

A densidade relativa (ρ_{rel}) do concreto celular é dada pela razão entre densidade aparente (ρ_{ap}) e a densidade do sólido ($\rho_{sól}$) que compõe a matriz desse concreto celular. [33]

$$\rho_{rel} = \frac{\rho_{ap}}{\rho_{sól}} \quad (8)$$

Onde:

ρ_{rel} – densidade relativa

ρ_{ap} – densidade aparente

$\rho_{sól}$ – densidade do sólido

A porosidade é dada por: [33]

$$P = (1 - \rho_{rel})$$

Onde:

P – porosidade

(9)

Para a medição da densidade do sólido que compõe a matriz dos corpos de prova do concreto celular, um picnômetro de gás hélio “Multi Pynometer Quanta Chrome”, localizado no LABMAT, no departamento de Engenharia Mecânica da UFSC, foi utilizado.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 AVALIAÇÃO DE VARIAÇÃO NO PROCESSO DE PRODUÇÃO

As figuras 5.1, 5.2 e 5.3 apresentam os valores atingidos para densidade, condutividade térmica e resistência à compressão, respectivamente. Além da variação dentro do subgrupo amostra, graficamente é possível ter uma idéia do tamanho da variação para os subgrupos hora e dia.

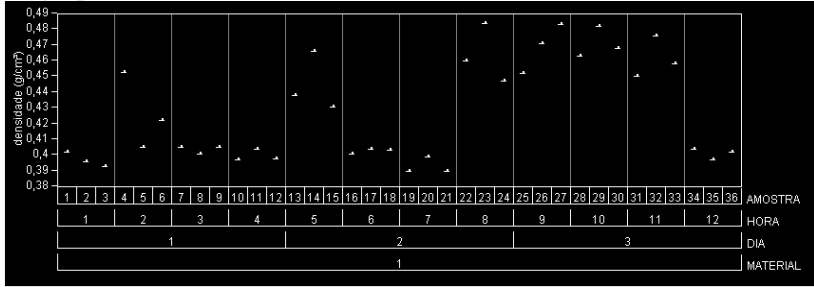


Figura 5.1 – Variação de densidade encontrada processo de produção do CCA

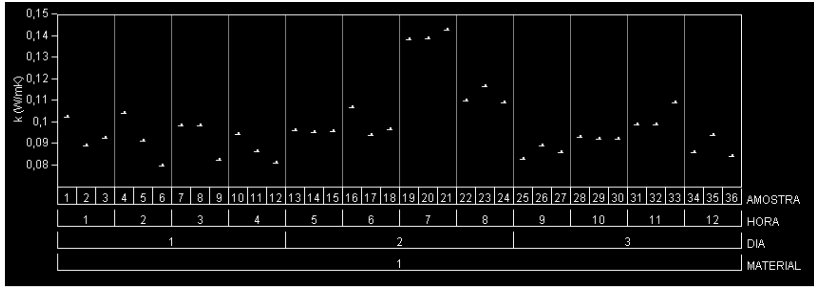


Figura 5.2 – Variação da condutividade térmica encontrada processo de produção do CCA

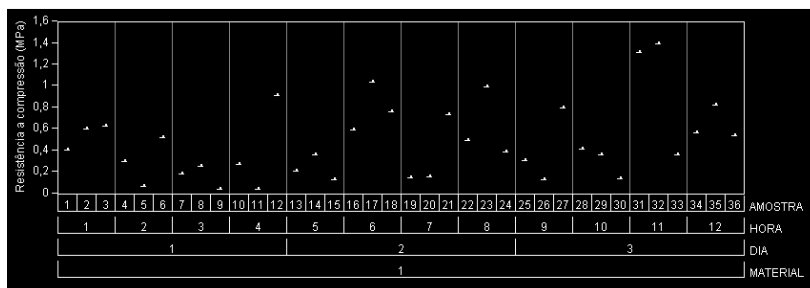


Figura 5.3 – Variação da resistência à compressão encontrada processo de produção do CCA

A tabela 5 apresenta a especificação de RILEM [19], na qual o CCA é classificado em termos de suas propriedades mecânicas. Analisando os valores de resistência à compressão, apresentados na figura 5.3, e utilizando a especificação de RILEM para CCA na tabela 5, as amostras coletadas na linha de produção são classificadas como baixa resistência à compressão, pois todos os valores atingidos estão abaixo de 1,6 MPa. Analisando os valores de densidade e de condutividade térmica, apresentados nas figuras 5.1 e 5.2, é possível afirmar que as amostras coletadas na linha de produção não seguem a classificação de RILEM, ou seja, para os valores de compressão abaixo de 1,8 MPa, deveríamos ter valores de densidade entre 200 e 400 kg/m³ e valores de condutividade térmica abaixo de 0,10 W/mK. A figura 5.1 apresenta valores de densidade entre 380 e 490 kg/m³ e a figura 5.2 apresenta valores de condutividade térmica entre 0,08 e 0,15 W/mK.

Tabela 5 – Classificação do CCA de acordo com suas características mecânicas [19]

Propriedade	Baixo	Médio	Alto
Resistência à compressão (MPa)	<1,8	1,8 – 4,0	> 4,0
Densidade (kg/m ³)	200 – 400	300 – 600	500 – 1000
Condutividade térmica (W/mK)	<0,10	0,6 – 0,14	> 0,12

Geralmente, os valores de resistência à compressão aumentam de forma linear com o aumento dos valores de densidade [20]. Valores de resistência à compressão para diferentes valores de densidade estão apresentadas na tabela 6 [21]. Os valores apresentados na tabela 6 são reportados na literatura [22,23,21,24,25]

Tabela 6 – Propriedades do CCA. Diferentes valores de resistência à compressão e condutividade térmica para diferentes valores de densidade [21]

Densidade (kg/m ³)	Resistência a Compressão (MPa)	Condutividade Térmica (W/mK)
400	1,3 – 2,8	0,07 – 0,11
500	2,0 – 4,4	0,08 – 0,13
600	2,8 – 6,3	0,11 – 0,17
700	3,9 – 8,5	0,13 – 0,21

Utilizando os valores da tabela 6 como referência, pode-se dizer que os valores de compressão obtidos estão abaixo do esperado, pois se esperava todos estes acima dos 1,3 MPa. Com relação aos valores de condutividade térmica, pode-se afirmar que estão dentro do esperado, visto que a maioria dos pontos ficou entre 0,08 e 0,13 W/mK, na mesma ordem de grandeza do que nos mostra a tabela 6, isto é, valores entre 0,07 e 0,11 W/mK.

Alguns fatores, não levados em consideração neste estudo, poderiam explicar o fato dos valores baixos de resistência à compressão:

- Ruídos inerentes ao ensaio de compressão, como por exemplo: tempo de secagem das amostras em estufa, temperatura de secagem das amostras, paralelismo entre as faces dos cubos ensaiados, trincas geradas durante o corte das amostras (obtenção dos cubos para o ensaio), transporte e manuseio das amostras, fixação da amostra no equipamento de ensaio e etc.
- Tempo de autoclave e tamanho de partículas de quartzo: a resistência à compressão aumenta com a formação de tobermorita e diminui levemente assim que a reação termina [26,27]. A resistência à compressão tende a aumentar após longos períodos de autoclave e com o aumento do tamanho das partículas de quartzo,

aumentando a quantidade de tobermorita e da sua cristalinidade [28,29].

- Estrutura porosa: a estrutura porosa do material cimentício, determinada pela sua porosidade, permeabilidade e distribuição de tamanho de poro, é uma característica muito importante com influência nas propriedades mecânicas e na durabilidade do CCA. A estrutura porosa de concretos esponjosos consiste em poros de gel, poros capilares e espaços vazios [30]. Os espaços vazios podem ser caracterizados pelo volume, tamanho, distribuição de tamanho, formato e espaçamento entre os espaços vazios [31]. Para densidades entre 500 e 1000 kg/m³, a resistência à compressão diminui com o aumento do volume dos espaços vazios. Para densidades acima de 1000 kg/m³, espaços vazios não tem influência na resistência à compressão, a qual é determinada pela composição da pasta utilizada [30].

A resistência à compressão dos concretos celulares, curados sob baixa temperatura, diminui com o aumento da porosidade, como proposto por Hoff [32], o qual também propôs uma equação para calcular a resistência mecânica em função da porosidade teórica de concretos celulares. Dados mais recentes foram usados para gerar os gráficos das figuras 5.4 e 5.5 [1].

Apesar das amostras coletadas nesta avaliação se tratarem de CCA, os valores de densidade *versus* compressão e os valores de densidade *versus* condutividade térmica estão melhor ajustadas com as curvas apresentadas nas figuras 5.4 e 5.5.

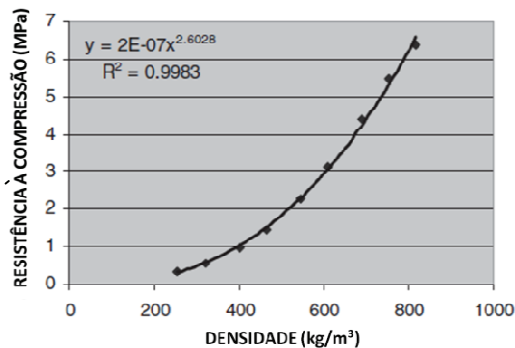


Figura 5.4 – Variação da resistência a compressão com a densidade de concretos celulares curadas sob baixas temperaturas.
(Fonte: Scheffler e Colombo 2005 [1])

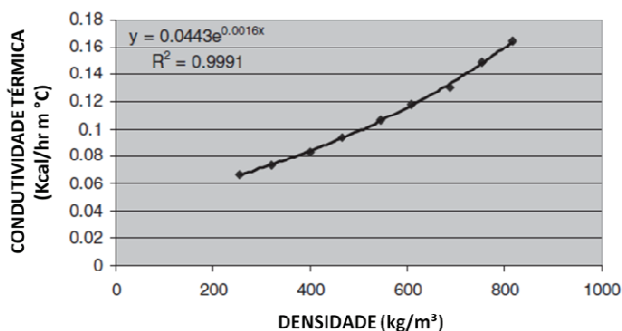


Figura 5.5 – Variação da condutividade térmica com a densidade de concretos celulares curadas sob baixas temperaturas.
(Fonte: Scheffler e Colombo 2005 [1])

Com os dados representados nas figuras 5.1, 5.2 e 5.3, foram geradas as cartas de controle de Shewart, com o objetivo de entender se o processo está sob controle e qual tipo de variação é encontrado neste.

A carta utilizada para tal avaliação é a chamada de \bar{X} (x barra) R.

Para a variável resposta densidade, figura 5.6, o processo se apresenta estável e sob controle na carta R. Na carta \bar{X} , a maioria dos pontos está fora dos limites superior e inferior. Isto significa que fatores de processo que estão entre os subgrupos hora e dia são os maiores responsáveis pela variação da linha de processo. Para se entender o que varia de hora em hora e dia a dia, como por exemplo, temperatura ambiente, manutenção de equipamentos, troca de operadores e etc., um estudo mais aprofundado do processo se faz necessário.

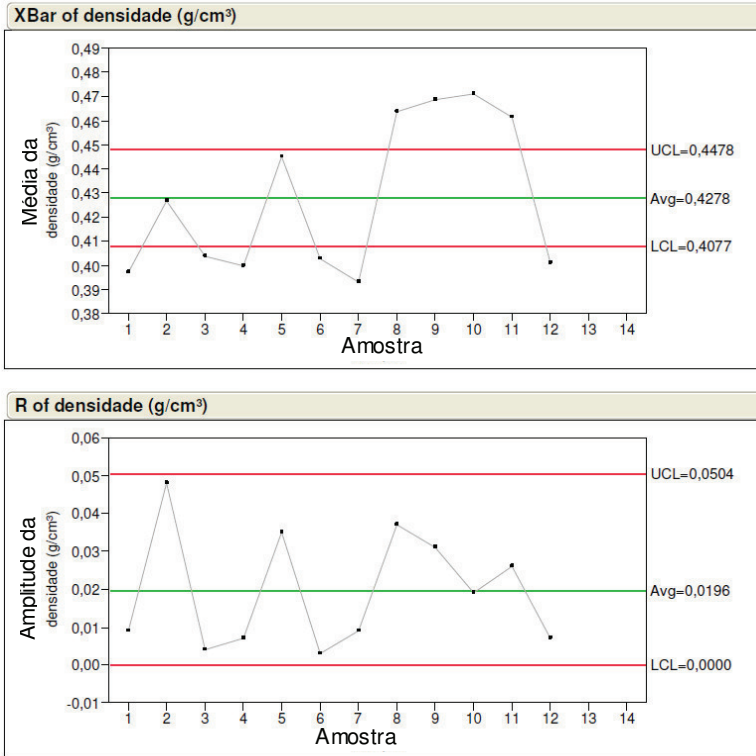


Figura 5.6 – Carta \bar{X} R para densidade

Para a variável resposta condutividade térmica, representada na figura 5.7, a carta R mostra um processo sob controle. A carta \bar{X} exibe apenas quatro pontos fora do controle, o que denota que a maior variação está dentro do subgrupo amostra.

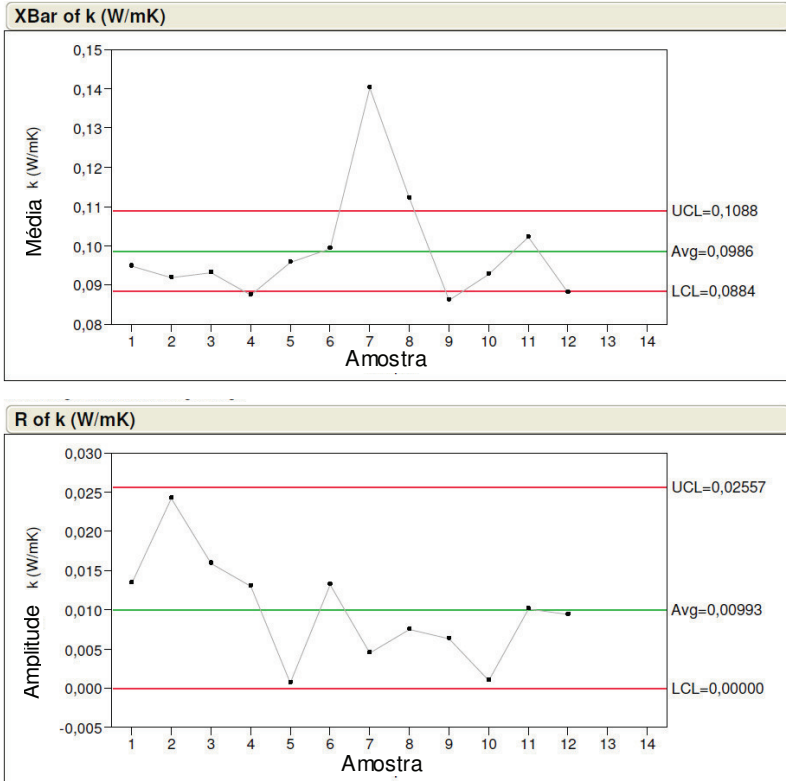


Figura 5.7 – Carta \bar{X} R para condutividade térmica

A carta R, apresentada na figura 5.8, para a variável resposta resistência à compressão, mostra um processo sob controle. Na carta \bar{X} , Apenas um ponto aparece fora dos controles, indicando que a maior variação está dentro do subgrupo amostra.

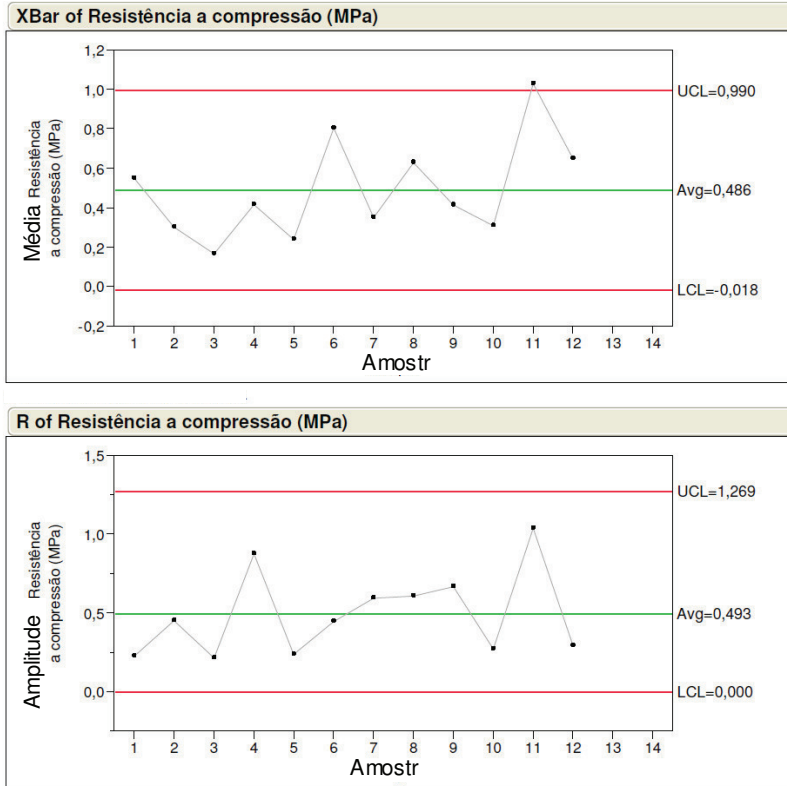


Figura 5.8 – Carta \bar{X} R para resistência à compressão

As figuras 5.6, 5.7 e 5.8 informam que as variações obtidas nos valores de densidade, condutividade térmica e resistência a compressão são consequência de fatores inerentes ao processo, ou seja, são originadas somente devido a causas comuns, sem a presença de causas especiais. Como causas comuns num processo de obtenção de CCA, podemos citar as seguintes variações:

- Parâmetros de mistura (tempo, temperatura, velocidade, etc.);
- Parâmetros de autoclavagem (temperatura, tempo, pressão, etc.);
- Matéria-prima (granulometrias, percentuais dos componentes químicos presentes, reologia da massa, etc.);
- Condições climáticas (temperatura e umidade);

- Operadores dos equipamentos da linha de produção e dos equipamentos de medição;
- Inerentes aos sistemas de medição (preparação, transporte e estocagem das amostras, erro dos equipamentos, etc.).

5.1.1 Microscopia eletrônica de varredura (MEV)

A figura 5.9 apresenta a imagem de duas das amostras selecionadas na linha de produção de CCA. Nesta figura é possível observar as estruturas celulares das amostras. Na figura 5.10 é possível observar os cristais de tobermorita na microestrutura da amostra. As composições químicas e os parâmetros de processo de ambas as amostras são os mesmos.

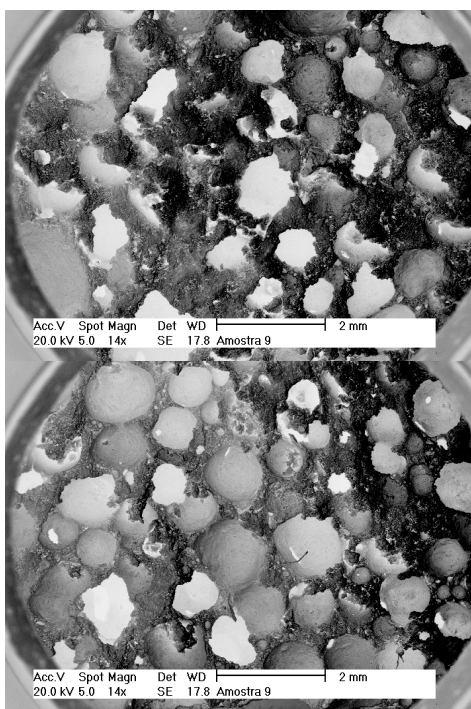


Figura 5.9 – Micrografias (MEV) de duas amostras originadas da avaliação de variação da linha de produção de CCA (aumento de 14x)

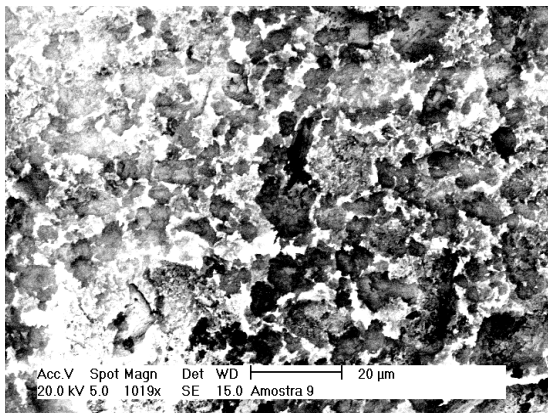


Figura 5.10 – Micrografia (MEV) de uma amostra retirada da avaliação de variação da linha de produção de CCA (aumento de 1019x)

5.1.2 Composição Química

Com o auxílio da sonda EDS presente no microscópio eletrônico de varredura, foi possível levantar os componentes químicos presentes nas amostras, conforme tabela 7. A presença dos componentes encontrados nas amostras era esperada.

Tabela 7 - Componentes químicos e seus respectivos percentuais em massa encontrados em uma das amostras

COMPONENTE QUÍMICO	PERCENTUAL EM MASSA (%)
Si	20,0
Ca	33,7
Al	1,0
O	44,4

5.2 DOE1

5.2.1 Densidade

A primeira questão a ser respondida, quando se começa a análise dos dados de um DOE, é: a variação gerada foi suficientemente grande para que os efeitos dos fatores se sobressaíam aos efeitos devido aos ruídos ou causas comuns do processo? A referência para o nosso DOE1

é a variação obtida na avaliação das variações inerentes ao processo de produção, discutida no item 5.1.

Graficamente, na figura 5.11, é possível entender o tamanho da variação gerada no DOE1 e, além disso, tirar algumas conclusões sobre o resultado do experimento. Sobre a variação, é possível afirmar que a variação gerada é consideravelmente grande quando comparadas à variação obtida nas peças da linha de produção. No DOE1 foram atingidos valores entre 0,40 e 0,85 g/cm³, enquanto que na avaliação da linha de produção os valores obtidos ficaram entre 0,38 e 0,48 g/cm³.

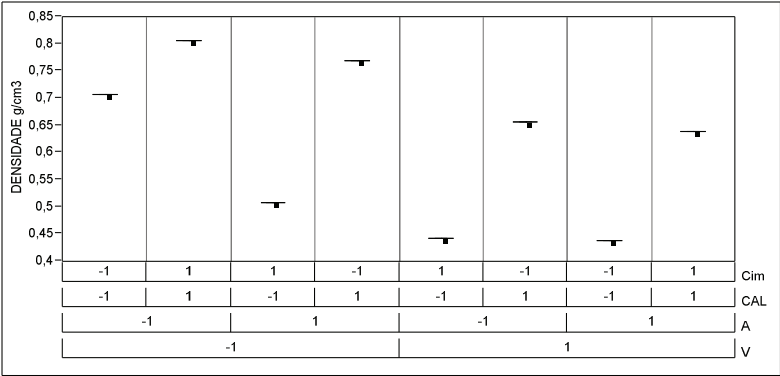


Figura 5.11 – Variação encontrada para densidade no DOE1

A figura 5.12 mostra dois fatores considerados como significativos para a variável resposta densidade, são eles o percentual de cal e o percentual de vermiculita. Nenhuma interação entre fatores se mostrou significativa.

Esperava-se que o percentual de alumínio fosse o mais significativo, visto que é usado como formador de bolhas no concreto. Não existe nenhuma teoria que suporte o percentual de Cal e de Vermiculita como os mais significativos para a densidade.

Analisando a matriz de confundimentos, o fator Cal está confundido com a interação de terceira ordem formada por %Vermiculita*%Al*%Cimento. Apesar de geralmente a natureza nos mostrar que é raro um efeito de uma interação de fatores de terceira ordem se sobressair ao efeito principal de apenas um fator, fisicamente seria mais fácil defender a idéia de que a interação entre alumínio, vermiculita e cimento seja mais significativa que o efeito principal originário do fator cal. O mesmo pode ser dito para o caso do fator

percentual de vermiculita, o qual está confundido com a interação de terceira ordem %Al*%Cal*%Cimento.

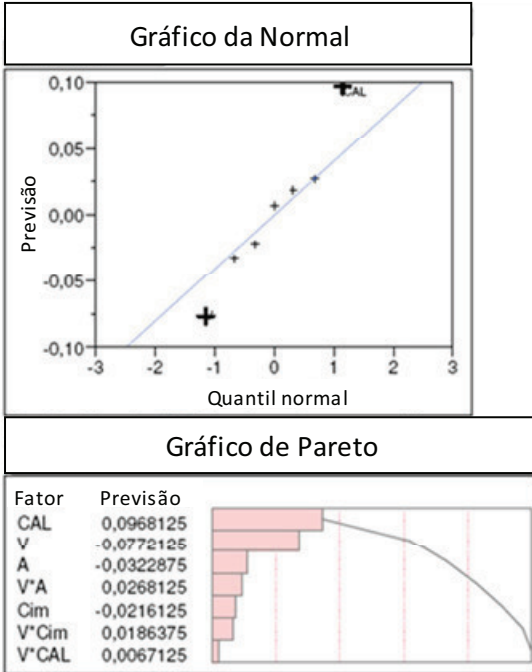


Figura 5.12 Gráfico de pareto e normal mostrando os fatores encontrados como significativos para a densidade no DOE1

5.2.2 Resistência à compressão

A figura 5.13 nos mostra a variação gerada para a variável resposta resistência à compressão no DOE1. Valores entre 0,3 e 3,5 MPa foram obtidos no experimento, nos dando uma variação consideravelmente maior que o obtido na avaliação do processo de produção do CCA, no qual foram obtidos valores de compressão entre 0,1 e 1,4 MPa.

Analisando o gráfico da normal e o gráfico de pareto, figura 5.13, nenhum fator se mostrou significativo para a variável resposta resistência à compressão. De qualquer forma, novamente os fatores percentual de Cal e de Vermiculita aparecem como os primeiros no pareto.

A figura 5.15 representa uma típica curva de compressão obtida no referido ensaio.

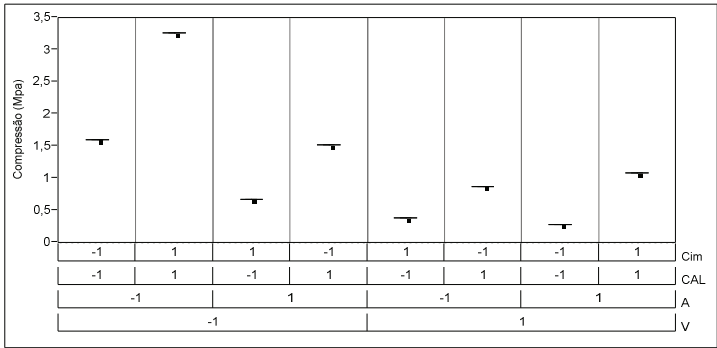


Figura 5.13 Variação encontrada para a resistência à compressão no DOE1

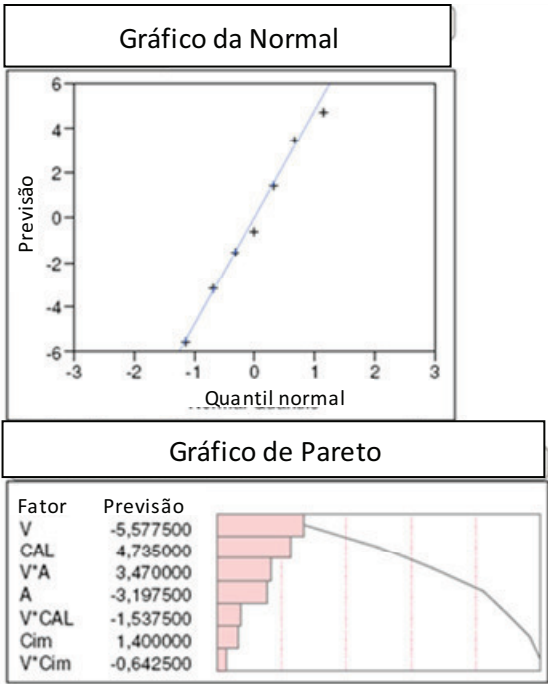


Figura 5.14 Nenhum fator apareceu como significativo para resistência a compressão no DOE1

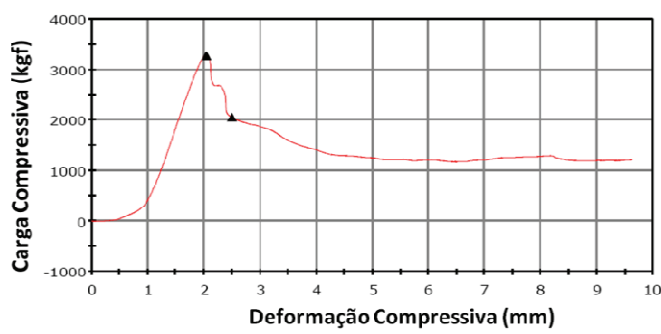


Figura 5.15 – Curva do teste de compressão amostra 2 (maior valor encontrado no DOE1)

5.2.3 Condutividade térmica

Na figura 5.16 é possível ver que a variação gerada ficou entre 0,10 e 0,19 W/mK, um pouco maior que a variação obtida na avaliação das variações obtidas com amostras da linha de produção do CCA, a qual ficou entre 0,07 e 0,15 W/mK.

Analisando os gráficos de normal e pareto, figura 5.17, novamente nenhum fator aparece como significativo e o percentual de Cal aparece como o primeiro no pareto.

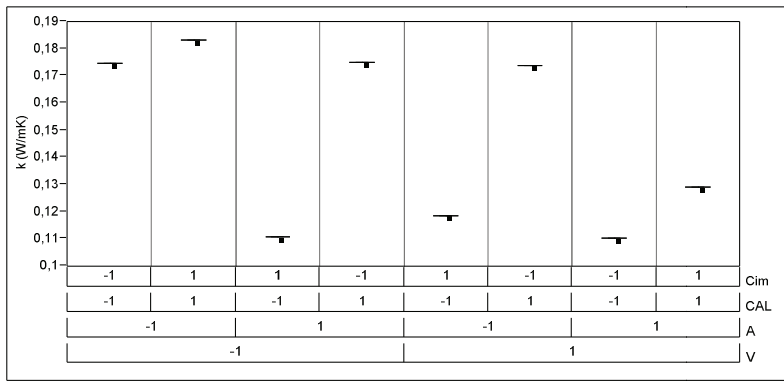


Figura 5.16 – Variação encontrada para valores de coeficiente de condutividade térmica no DOE1

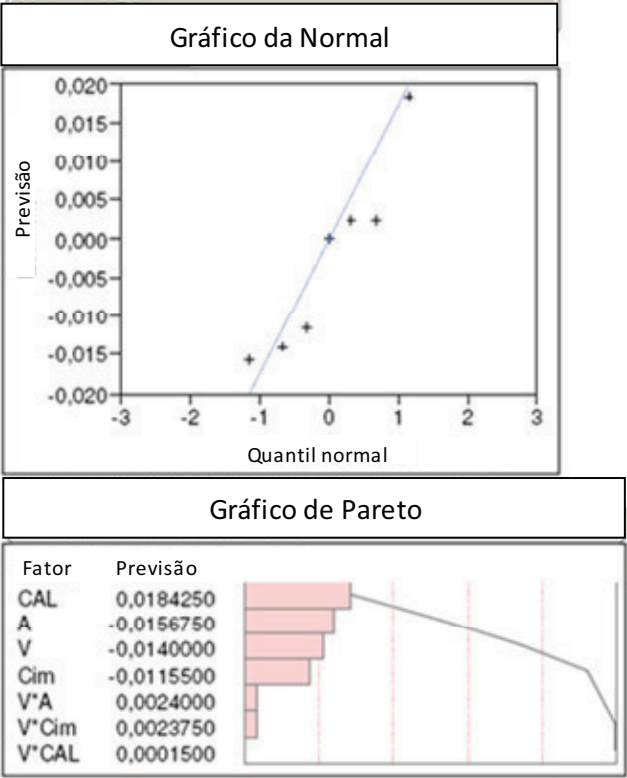


Figura 5.17 – Nenhum fator aparece como significativo para a variável resposta coeficiente de condutividade térmica

5.2.4 Microscopia eletrônica de varredura

As amostras com maior e menor densidade obtidas no experimento foram analisadas no MEV e estão representadas na figura 5.18, onde é possível perceber a diferença no tamanho e na distribuição das células. Na amostra mais densa, identificada pela letra “a” na figura 5.18, é possível afirmar que os poros são menores e distribuídos em um número maior que os encontrados na amostra menos densa, esta identificada pela letra “b” na mesma figura.

Na figura 5.19, estão representados os cristais de tobermorita discutidos no item 2.1.5.2.

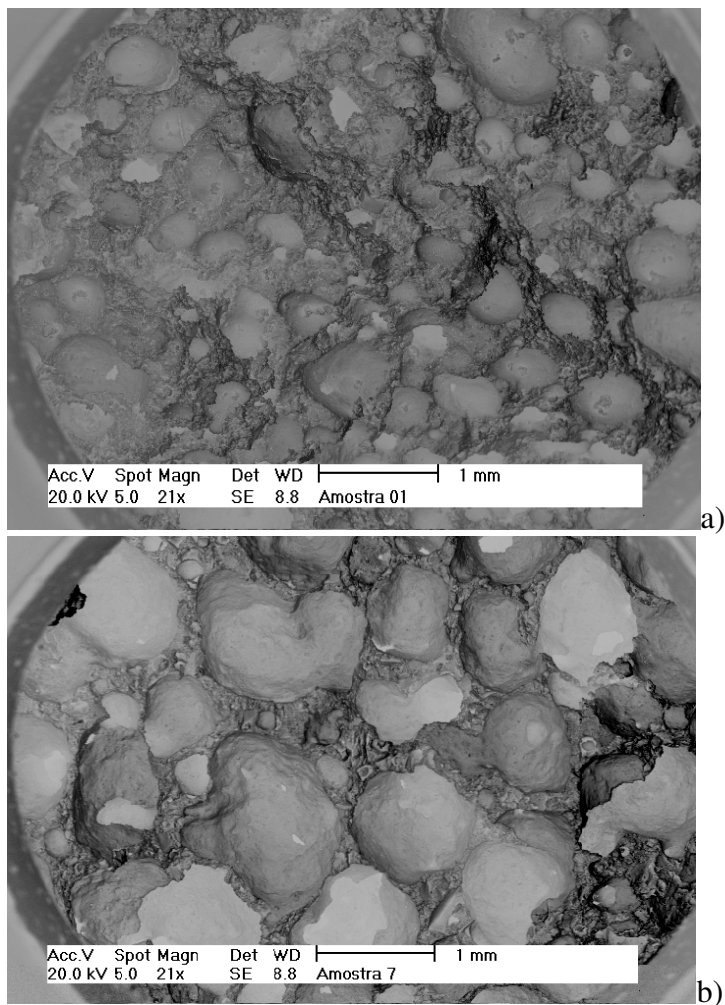


Figura 5.18 – Micrografia (MEV) mostrando: a) Amostra com a maior densidade encontrada no DOE1; b) Amostra com a menor densidade encontrada no DOE1

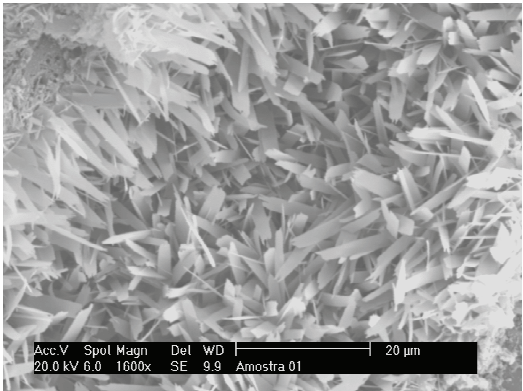


Figura 5.19 – Micrografia mostrando os cristais de tobermorita encontrados na amostra que apresentou o menor valor de densidade no DOE1. (aumento 1600x)

5.3 DOE2

A tabela 8 apresenta os valores de condutividade térmica, resistência à compressão e densidade obtidos em cada tratamento do DOE2.

Tabela 8 – Valores de condutividade térmica, resistência a compressão e densidade encontrados no segundo experimento planejado (DOE2)

Tratamento	Condutividade térmica k (W/mK)	Resistência à compressão (MPa)	Densidade (g/cm³)
1	0,149	0,87	0,602
2	0,157	2,33	0,712
3	0,182	1,80	0,771
4	0,148	1,05	0,673
5	0,096	0,27	0,361
6	0,097	0,62	0,394
7	0,098	0,40	0,385
8	0,112	0,34	0,429
9	0,142	1,69	0,617
10	0,146	1,73	0,589
11	0,110	1,31	0,480
12	0,142	2,26	0,627
13	0,113	0,52	0,410
14	0,099	0,83	0,408
15	0,098	0,69	0,376
16	0,109	0,80	0,447

5.3.1 Densidade

Analisando a distribuição dos dados na figura 5.20, é possível afirmar que a variação gerada foi suficientemente grande, nos mesmos níveis alcançados pelo DOE1. Além desta informação, já é possível prever que o percentual de alumínio é candidato forte a fator significativo para a variável reposta densidade. Todos os pontos referentes ao nível -1 deste fator se encontram na parte superior do gráfico, enquanto que todos os pontos referentes ao nível +1 deste fator se encontram na parte inferior do gráfico.

A figura 5.21 nos confirma a previsão feita no parágrafo anterior, ou seja, analisando os gráficos de pareto e normal, é possível perceber que o percentual de alumínio é o mais significativo. Além do efeito principal dado pelo percentual de Alumínio, a interação de segunda ordem entre %V*%Al, outra interação de terceira ordem entre %V*%Cal*%Cim e o fator %V sozinho também aparecem como significativos. Apesar de estes outros fatores estarem aparecendo como significativos, é possível observar que eles estão muito próximos a linha do gráfico da normal, quando comparados com o %Al. Podemos afirmar que apenas o %Al é realmente significativo para a variável resposta densidade.

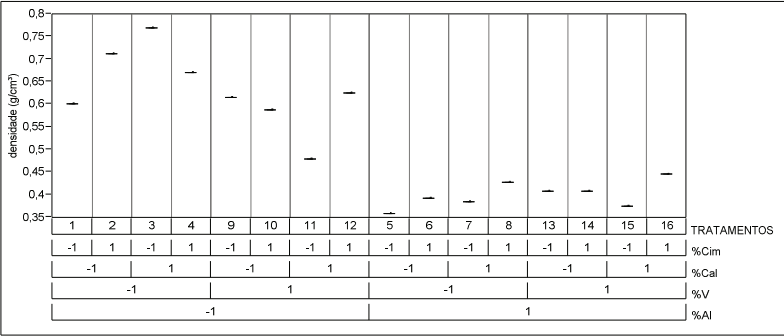


Figura 5.20 – Variação nos valores de densidade gerada no DOE2

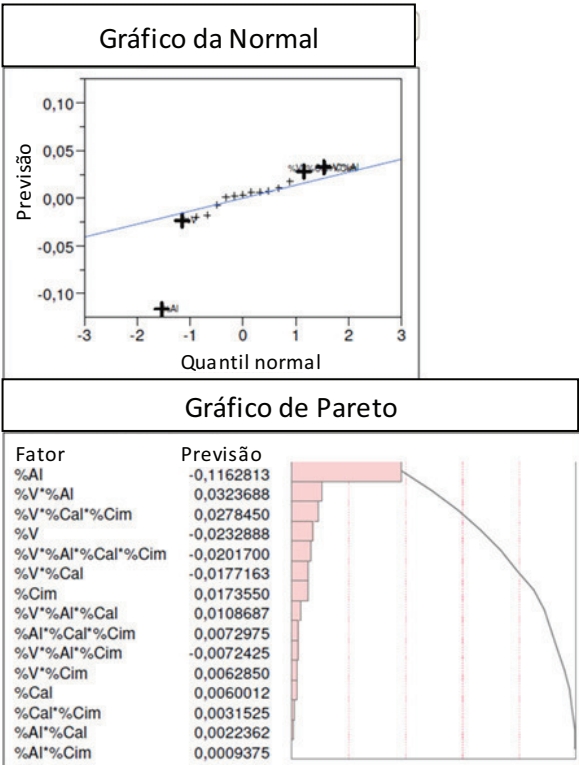


Figura 5.21 – Fatores significativos para a variável resposta densidade encontrados no DOE2

5.3.2 Resistência à compressão

A figura 5.22 apresenta a variação gerada no DOE2, a qual se mostra significativamente maior que a obtida na avaliação da linha de produção, a qual apresentou valores entre 0,1 e 1,4 MPa. Novamente é possível notar graficamente o efeito do percentual de alumínio.

Analizando os gráficos de pareto e normal, apresentados na figura 5.23, o %Al aparece como o grande fator responsável pela variação gerada no DOE2. Assim como na variável resposta densidade, algumas interações apareceram como significativas neste experimento e não serão consideradas, pois seus efeitos são significativamente menores que o efeito causado pelo %Al.

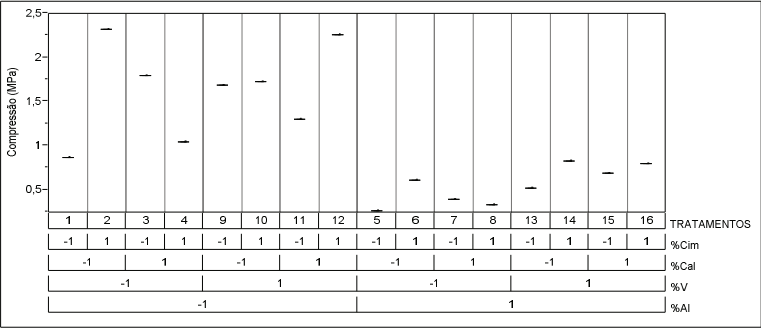


Figura 5.22 – Fatores significativos para a variável resposta densidade encontrados no DOE2

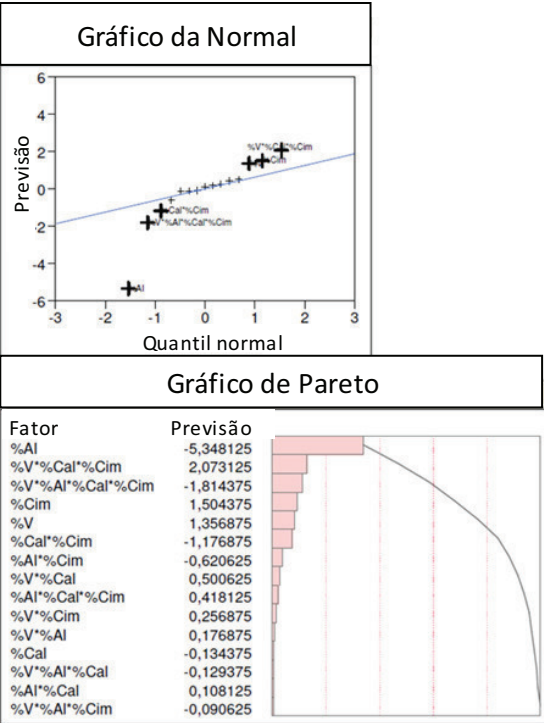


Figura 5.23 – Fatores significativos para a variável resposta densidade encontrados no DOE2

Todas as curvas geradas nos ensaios de compressão estão representadas nas figuras 5.24 e 5.25.

Amostras de 1 a 8

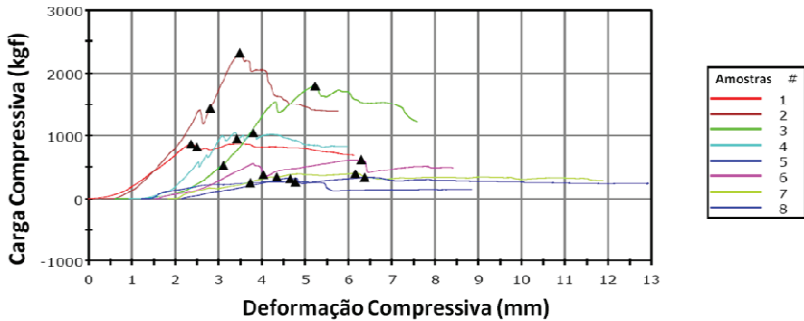


Figura 5.24 – Curvas de compressão e deformação para as amostras enumeradas de 1 a 8

Amostras de 9 a 16

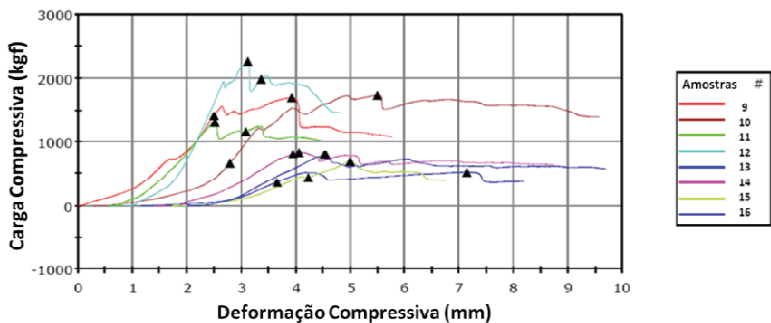


Figura 5.25 – Curvas de compressão e deformação para as amostras enumeradas de 9 a 16

5.3.3 Condutividade térmica

A variação gerada no DOE2, figura 5.26, mostra que a variação gerada para a variável resposta coeficiente de condutividade térmica ficou no mesmo nível da variação gerada no DOE1. Também é possível notar que o percentual de alumínio tem o potencial para ser o fator mais significativo para a referida variável resposta.

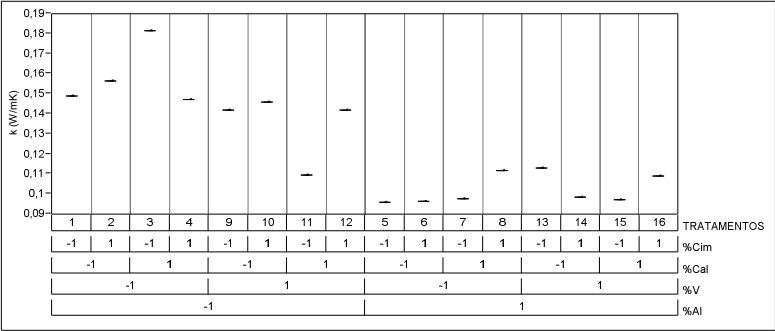


Figura 5.26 – Variação nos valores de condutividade térmica gerada no DOE2

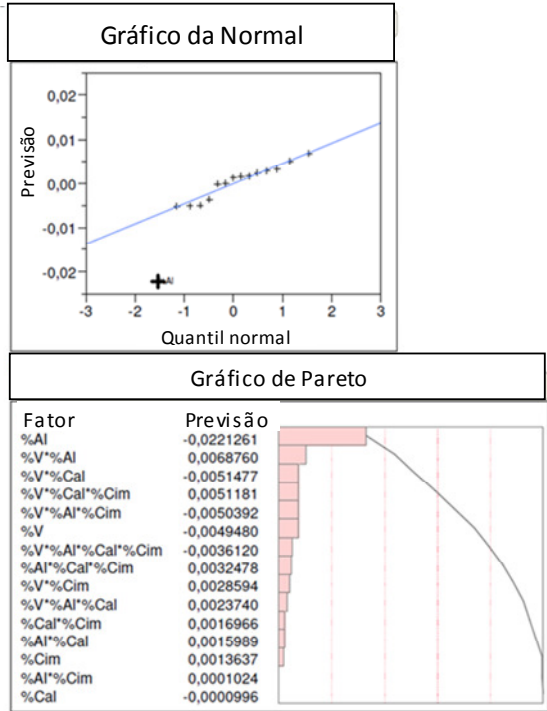


Figura 5.27 – Percentual de Alumínio aparece como único fator significativo para a variável resposta coeficiente de condutividade térmica

5.3.4 Modelo reduzido

Com o objetivo de entender o quanto o fator %Al é responsável pelas respostas obtidas no experimento, este fator foi colocado como único no modelo e uma nova análise foi gerada no software JUMP8, onde o valor de R^2 foi gerado e analisado.

Coefficiente de determinação, ou R^2 , é um valor usado para medir a variância total gerada na variável resposta devido ao modelo reduzido proposto. Valores altos de R^2 significam que o modelo é bom. [14]

A figura 5.29 apresenta graficamente o modelo reduzido proposto, traçando um gráfico de densidade medida, eixo y, e densidade prevista pelo modelo, eixo x, para a variável resposta densidade, com o R^2 igual a 0,79, o que significa que 79% da variação gerada nesta variável resposta é de responsabilidade do fator %Al.

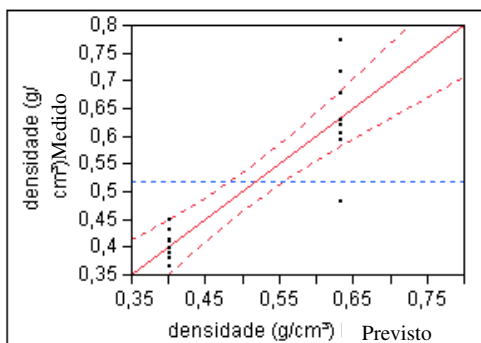


Figura 5.28 – Representação gráfica do modelo reduzido para a variável resposta densidade, tendo como valor de R^2 igual a 0,79

A equação linear que representa o modelo reduzido para a variável resposta densidade é:

$$D = 0,5176 - 0,1162 * \%Al \quad (8)$$

onde: D – densidade (g/cm^3)

%Al – fator %Al, o qual varia entre os valores -1 e 1

A figura 5.30 apresenta graficamente o modelo reduzido proposto neste item. O valor de R^2 é de 0,67, significando que 67% da variação da variável resistência a compressão é explicado pelo fator %Al.

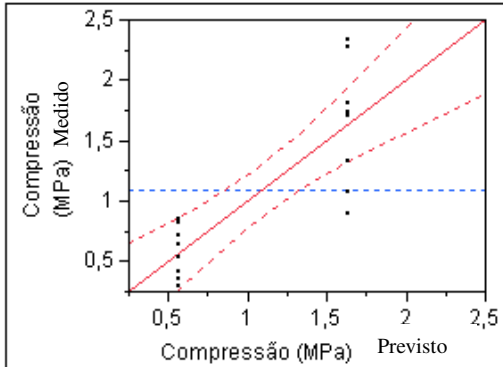


Figura 5.29 – Representação gráfica do modelo reduzido para a variável resposta compressão, tendo como valor de R^2 igual a 0,67

A equação linear que representa o modelo reduzido para a variável resposta resistência a compressão obtida é:

$$\sigma = 1,0949 - 0,5348 * \%Al \quad (9)$$

onde: σ – resistência à compressão (MPa)

$\%Al$ – fator $\%Al$, o qual varia entre os valores -1 e 1

A figura 5.31 apresenta graficamente o modelo reduzido proposto neste item. O valor de R^2 é de 0,72, significando que 72% da variação da variável resposta coeficiente de condutividade térmica é explicada pelo fator $\%Al$.

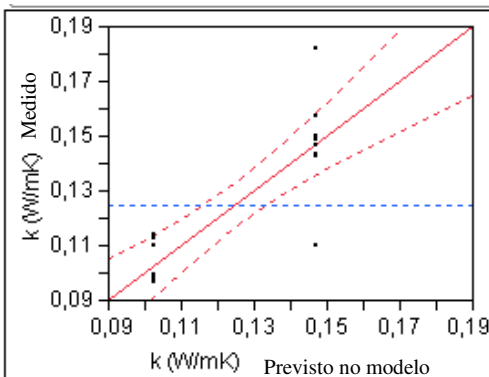


Figura 5.30 – Representação gráfica do modelo reduzido para a variável resposta condutividade térmica, tendo como valor de R^2 igual a 0,72

A equação linear que representa o modelo reduzido para a variável resposta resistência a compressão obtida é:

$$k=0,1248-0,0221*\%Al \quad (10)$$

Onde: k – coeficiente de condutividade térmica (W/mK)

%Al – fator %Al, o qual varia entre os valores -1 e 1

5.3.5 Relação entre características mecânicas e térmicas

Com o objetivo de entender a relação entre as características mecânicas, densidade e resistência à compressão, e térmica, coeficiente de condutividade térmica, gráficos com os valores obtidos no DOE2 foram gerados e regressões lineares foram obtidas. O coeficiente de determinação, R^2 , e análise de variância, ANOVA, foram usados para avaliar as relações lineares propostas.

A figura 5.32 apresenta a relação linear entre densidade e coeficiente de condutividade térmica. Todos os pontos aparecem bastante próximos a reta gerada.

Quando pequenos espaços vazios são formados pela ligação ou fundição de porções do material sólido, uma matriz rígida é criada. Quando não há ligação entre esses espaços, o sistema é conhecido como um isolante celular. A transferência de calor através desse sistema pode incluir: condução através do material sólido, condução através do ar nos espaços vazios e troca radiante entre superfícies da matriz sólida. [33]

Em sólidos celulares, as células são suficientemente pequenas para que não exista convecção dentro delas. A transferência de calor é definida pela soma da condução térmica através material sólido com a condução térmica através do ar (ou outro fluido) contido dentro da célula. [1]

Quanto menor for o valor de densidade do CCA, maior será a quantidade de ar contida no material, menor será o percentual sólido da peça e, conseqüentemente, menor será o valor de condutividade térmica. Os valores de condutividade térmica do concreto e do ar estão apresentados na tabela 9.

**Tabela 9 – Condutividade térmica da argamassa de cimento e do ar
(fonte Incropera, Dewitt, Bergman, Lavine [33])**

Material	Condutividade Térmica (W/mK)
Argamassa de Cimento	0,72
Ar	0,22

A figura 5.33 demonstra um valor de R^2 alto, 0,95. Além disso, o valor de F (valor do teste estatístico) obtido pode ser considerado alto.

Teste estatístico, F, dentre outras coisas, é usado para testar a significância de uma regressão ou testar os subgrupos de parâmetros em um modelo de regressão. [14]

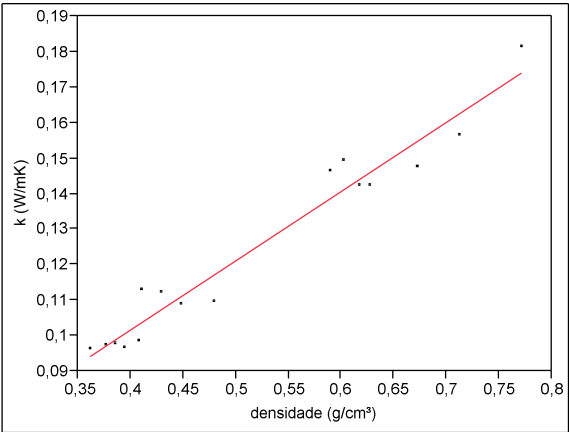


Figura 5.31 – Relação linear entre densidade e coeficiente de condutividade térmica

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO (ANOVA)				
FONTE DE VARIAÇÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADOS MÉDIOS	RAZÃO F
MODELO	1	0,263	0,263	292,07
ERRO	14	0,013	0,001	
TOTAL	15	0,275		
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO R^2				
R^2	0,95			

Figura 5.32 – Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação (R^2) do modelo proposto para a relação entre densidade e condutividade térmica

A equação da reta da regressão linear que descreve a relação entre densidade e coeficiente de condutividade térmica do experimento é:

$$D = -0,0942 + 4,9015 \cdot k \quad (11)$$

onde: D – Densidade (g/cm^3)

k – coeficiente de condutividade térmica (W/mK)

A figura 5.34 apresenta a relação linear entre densidade e resistência à compressão, gerada a partir dos dados obtidos no DOE1. Nesta figura é possível observar que os pontos não estão tão próximos da reta quanto na regressão apresentada na figura 5.32. De qualquer modo, a figura 5.35 nos dá valores de R^2 de 0,68, o que não é considerado um valor baixo para o modelo, e o valor de F igual a 29,72, o qual também é considerado alto para um modelo de regressão linear.

A resistência mecânica caiu conforme a densidade diminuiu, conforme esperado, visto que as paredes das células tendem a serem menos espessas e o percentual de parte sólida também cai com a diminuição da densidade, o que acarreta em menores valores de resistência mecânica.

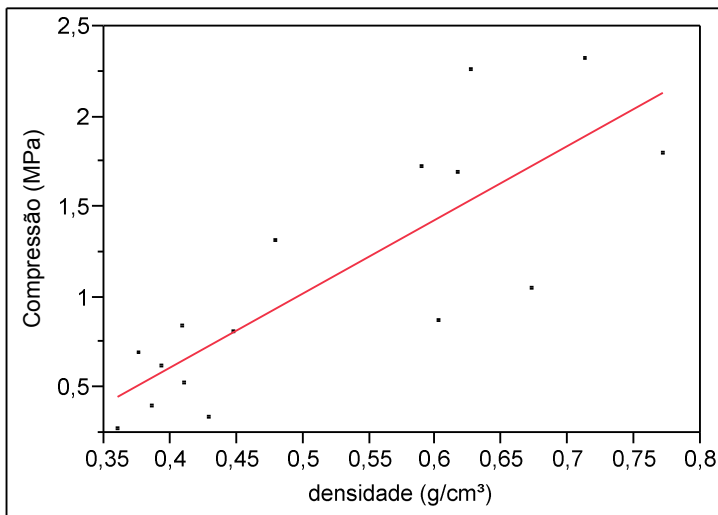


Figura 5.33 – Relação linear entre densidade e resistência à compressão

ANÁLISE DE VARIÂNCIA DO MODELO (ANOVA)				
FORTE DE VARIAÇÃO	GRAUS DE LIBERDADE	SOMA DOS QUADRADOS	QUADRADOS MÉDIOS	RAZÃO F
MODELO	1	4,638	4,638	29,73
ERRO	14	2,184	0,156	
TOTAL	15	6,282		
COEFICIENTE DE DETERMINAÇÃO R ²				
R ²	0,68			

Figura 5.34 – Análise de variância (ANOVA) e coeficiente de determinação (R²) do modelo proposto para a relação entre densidade e resistência à compressão

A equação da reta da regressão linear que descreve a relação entre densidade e resistência a compressão do experimento é:

$$\sigma = -1,0287 + 4,1026 * D \quad (12)$$

nde: D – Densidade (g/cm³)

σ – resistência à compressão (MPa)

5.3.6 Microscopia eletrônica de varredura

As figuras 5.38, 5.39, 5.40 e 5.41 ilustram a estrutura porosa das amostras que apresentaram maiores valores de densidade, maiores valores de resistência à compressão e maiores valores de condutividade térmica.

Na figura 5.38 é possível observar que a amostra 1 apresenta uma estrutura com poros bem distribuídos e com tamanhos semelhantes, tendo valor mínimo de 274 μm e valor máximo de 558 μm . Nesta mesma figura, a amostra 2 apresenta tamanhos de poros mais baixos que na amostra 1, tendo um valor mínimo de 113 μm e um valor máximo de 385 μm . Além dos tamanhos de poros serem menores, é possível também observar que estes poros estão menos distribuídos na amostra 2. Esta amostra apresentou o segundo maior valor de densidade dentre todas as amostras obtidas no DOE2 (0,71 g/cm^3).

A figura 5.39 apresenta outras duas amostras que apresentaram densidades altas como resultados do experimento. A amostra 3 apresentou uma densidade de 0,77 g/cm^3 , a maior obtida no DOE2, e a amostra 4 apresentou uma densidade de 0,67 g/cm^3 . Pode-se afirmar que as imagens da figura 5.39 apresentam uma estrutura com poros pequenos bem distribuídos, ratificando os altos valores de densidade obtidos e já discutidos anteriormente. Com relação aos valores de tamanhos de poros, a amostra 3 apresentou um valor mínimo de 171 μm e um valor máximo de 488 μm . A amostra 4 apresentou um valor mínimo de 167 μm e um valor máximo de 759 μm .

A figura 5.40 ilustra duas amostras que apresentaram valores altos de densidade no experimento, ficando estes na faixa dos 0,6 g/cm^3 . A novidade apresentada nesta figura são os primeiros valores de tamanho de poros acima de 1 mm, presentes na amostra 9. Mais precisamente, a amostra 9 apresentou como valores de tamanhos de poros um valor máximo de 1120 μm e um valor mínimo de 266 μm . A amostra 10 apresenta alguns valores de tamanho de poros na ordem de 800 μm , distribuídos de forma homogênea, porém ainda com poucos espaços vazios, confirmando assim o valor alto de densidade obtido no experimento (0,59 g/cm^3).

A figura 5.41 apresenta as últimas duas amostras que obtiveram os maiores valores de densidade no experimento. São elas as amostras 11 e 12. A amostra 11, assim como a amostra 9 da figura anterior, apresenta valores de tamanhos de poros acima de 1 mm. Dentre as

amostras que tinham na sua composição o menor percentual de alumínio, a amostra 11 foi a que apresentou o menor valor de densidade ($0,48 \text{ g/cm}^3$). Analisando o tratamento 11 do DOE2, verifica-se que este tratamento está com o valor mínimo de percentual de cimento e com os valores máximos de quantidade de cal e vermiculita, o que valida as previsões apresentadas no item 4.2.2.1. A amostra 12 apresenta valores de tamanhos de poros muito semelhantes ao apresentado na amostra 4 (figura 5.39). Tamanhos de poros estes com valores mínimo e máximo de $217 \mu\text{m}$ e $798 \mu\text{m}$, respectivamente. A densidade desta amostra ficou na ordem de $0,6 \text{ g/cm}^3$, também muito semelhante à amostra 4.

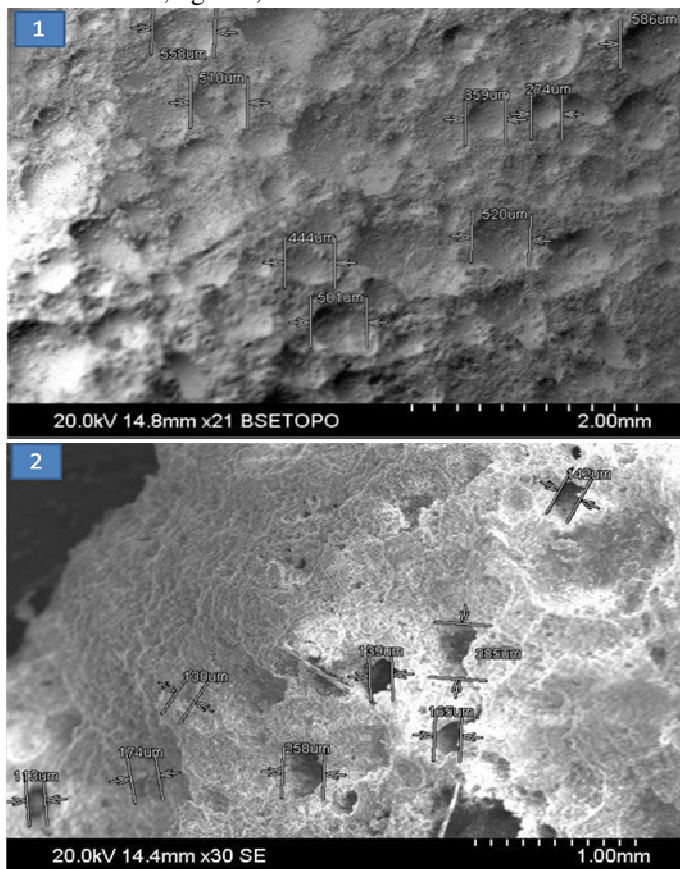


Figura 5.35 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 1 e 2. Na amostra 1, tamanhos de poros de 274 a $558 \mu\text{m}$. Na amostra 2, tamanhos de poros de 113 a $385 \mu\text{m}$.

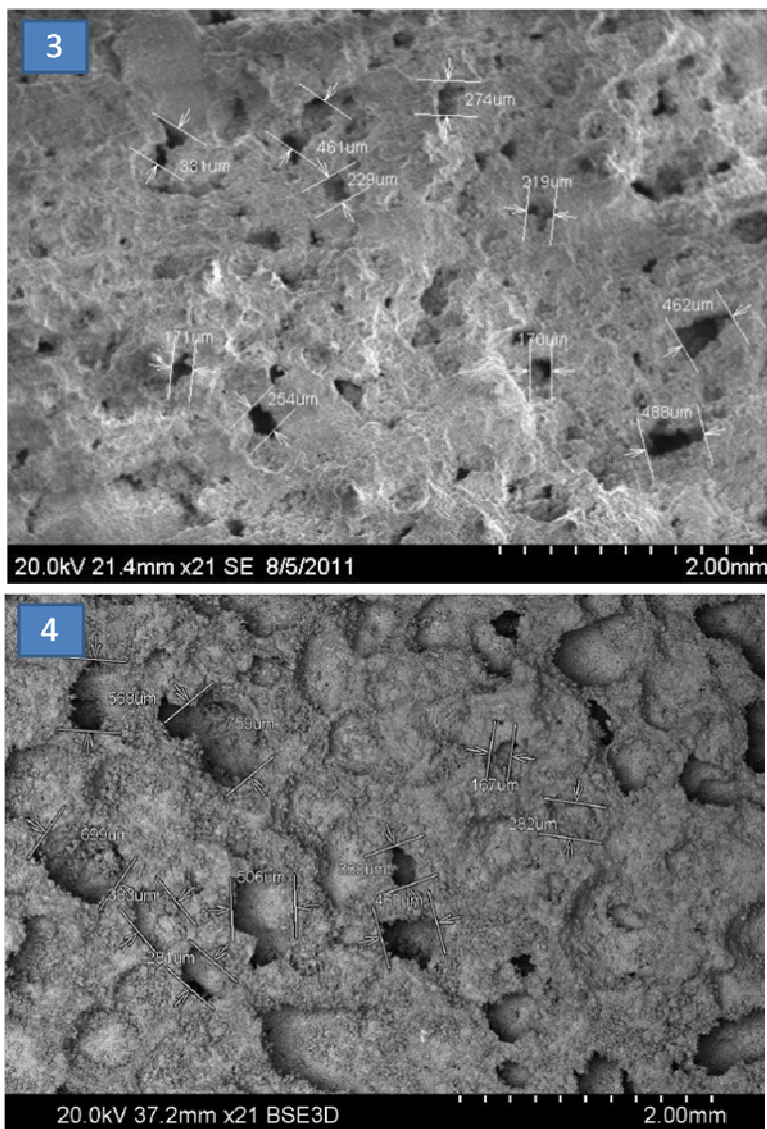


Figura 5.36 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 3 e 4. Na amostra 3, tamanhos de poros de 171 a 488 μm . Na amostra 4, tamanhos de poros de 167 a 759 μm .

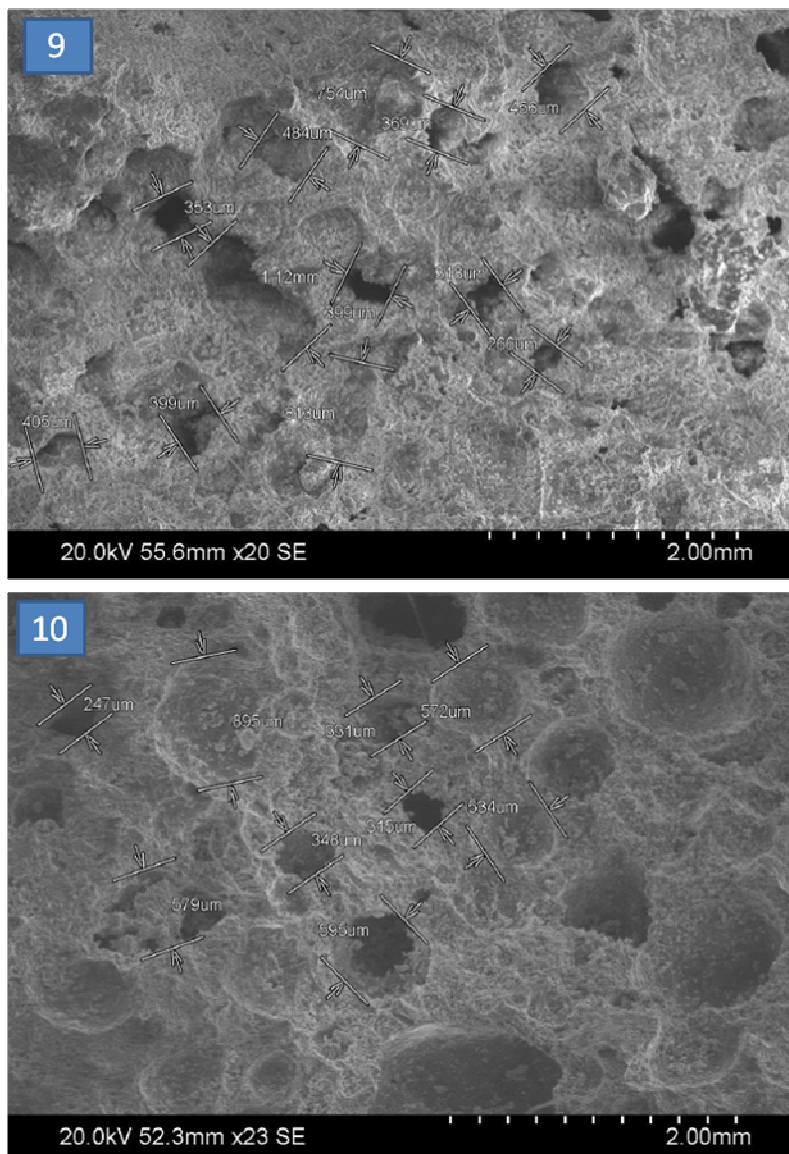


Figura 5.37 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 9 e 10. Na amostra 9, tamanhos de poros de 266 a 1120 μm . Na amostra 10, tamanhos de poros de 247 a 895 μm .

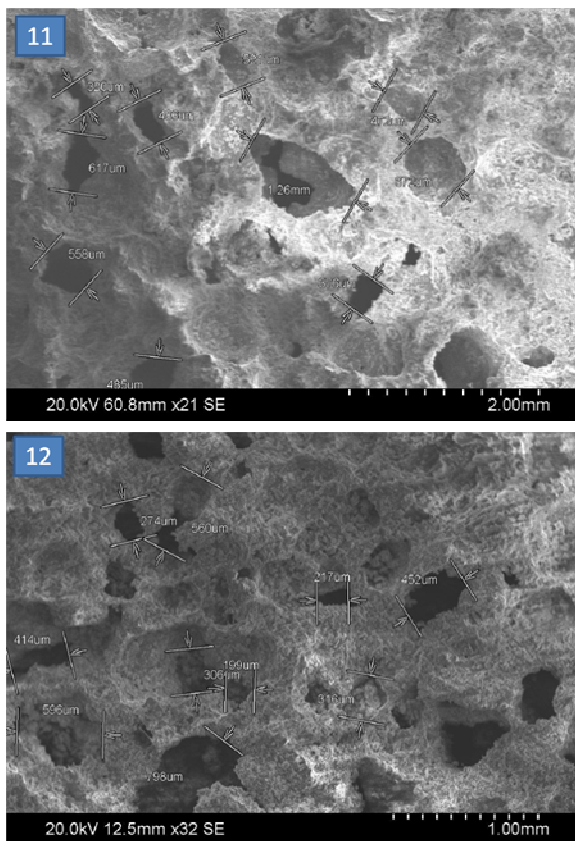


Figura 5.38 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 11 e 12. Na amostra 11, tamanhos de poros de 320 a 1126 μm . Na amostra 12, tamanhos de poros de 217 a 798 μm .

As figuras 5.42, 5.43, 5.44 e 5.45 apresentam o grupo de amostras que obtiveram os menores valores de densidade, de condutividade térmica e de resistência à compressão. Todas estas amostras têm presente na sua composição a quantidade máxima de alumínio usada no experimento (DOE2).

A figura 5.42 apresenta informações sobre as amostras 5 e 6 do DOE2. A amostra 5 apresenta valores de tamanhos de poros mínimo de 118 μm e máximo de 904 μm . Esta foi a amostra que apresentou o menor valor de densidade dentre todas as amostras obtidas no DOE2 (0,36 g/cm^3). A amostra 6 também apresentou um valor baixo de densidade (0,39 g/cm^3), porém esta também apresentou valores altos de tamanho de poro, atingindo um valor máximo de 1,5 mm.

As amostras 7 e 8 estão representadas na figura 5.43. A amostra 7 segue o padrão da maioria das amostras que atingiram baixa densidade no experimento, apresentando um mínimo de tamanho de poro de 119 μm e um máximo de 853 μm . A amostra 8 foi a que apresentou os maiores valores de tamanho de poros, dentre todas as amostras do experimento, apresentando um valor mínimo de 690 μm e um valor máximo de 1180 μm .

As amostras 13 e 14, ilustradas na figura 5.44, apresentaram o mesmo valor de densidade no experimento. Os seus valores de tamanho de poros e a sua distribuição também apresentam muita similaridade.

A figura 5.45 apresenta as últimas duas amostras do experimento. As amostras 15 e 16 também apresentam tamanhos de poros semelhantes à maioria das amostras com densidades baixas do experimento, sendo que a amostra 16 apresenta um tamanho de poro máximo um pouco acima de 1 mm (1060 μm).

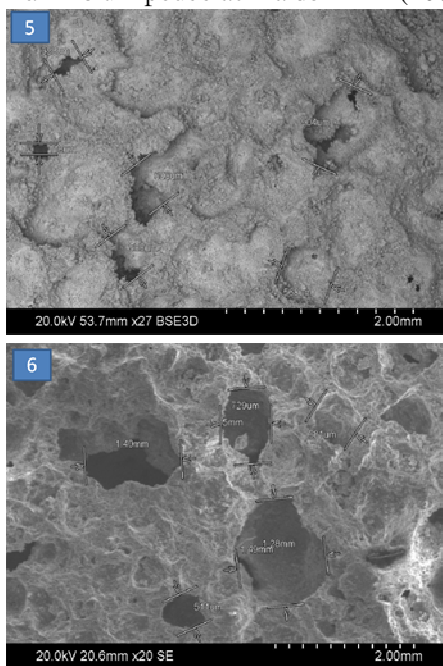


Figura 5.39 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 5 e 6. Na amostra 5, tamanhos de poros de 118 a 904 μm . Na amostra 6, tamanhos de poros de 511 a 1500 μm .

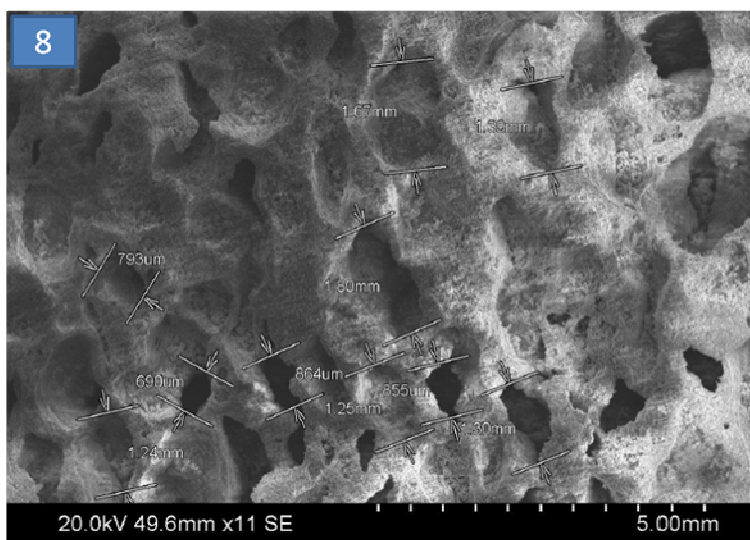
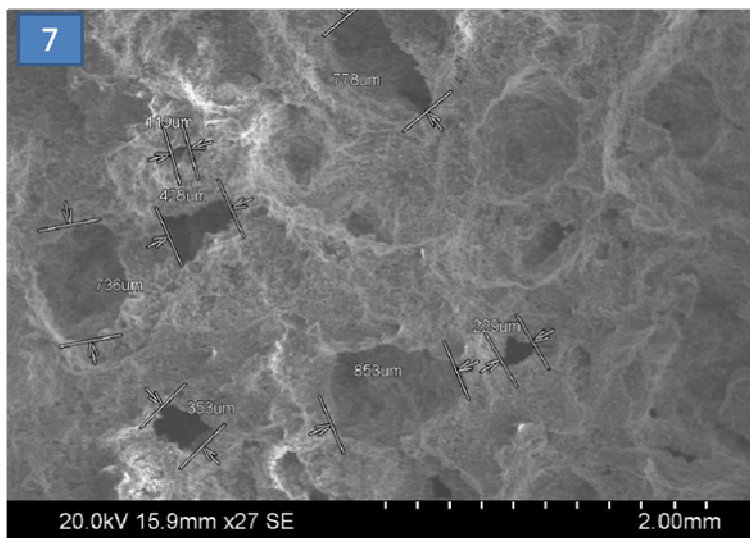


Figura 5.40 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 7 e 8. Na amostra 7, tamanhos de poros de 119 a 853 μm . Na amostra 8, tamanhos de poros de 690 a 1800 μm .

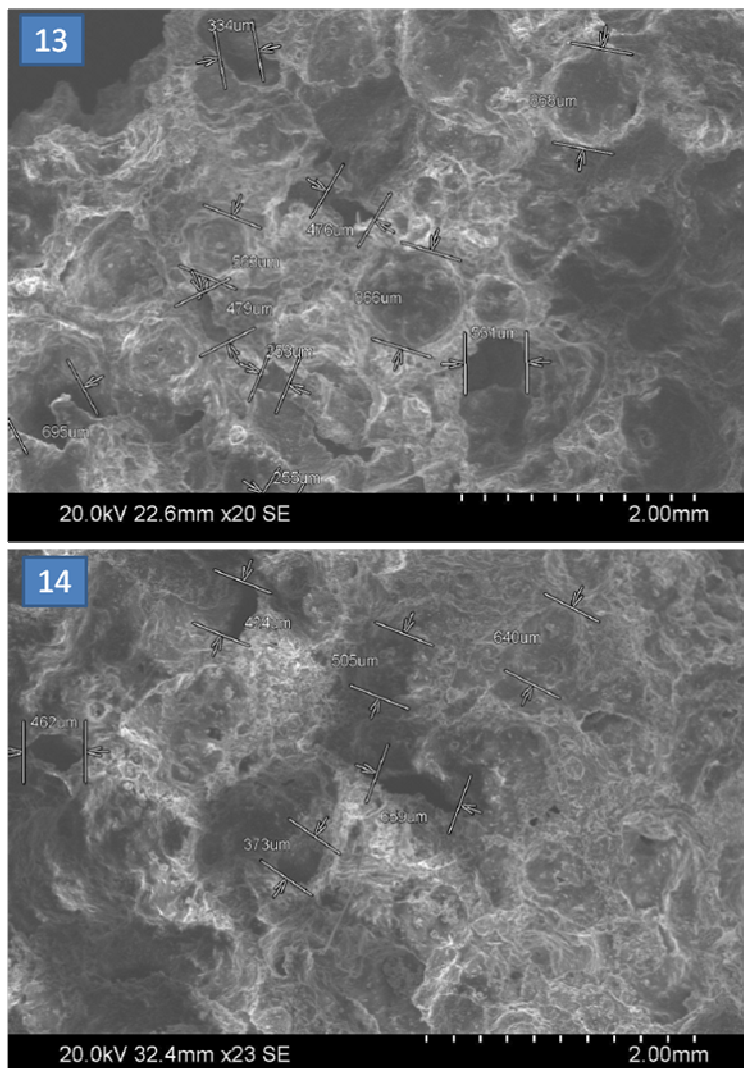


Figura 5.41 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 13 e 14. Na amostra 13, tamanhos de poros de 255 a 866 µm. Na amostra 14, tamanhos de poros de 373 a 659 µm.

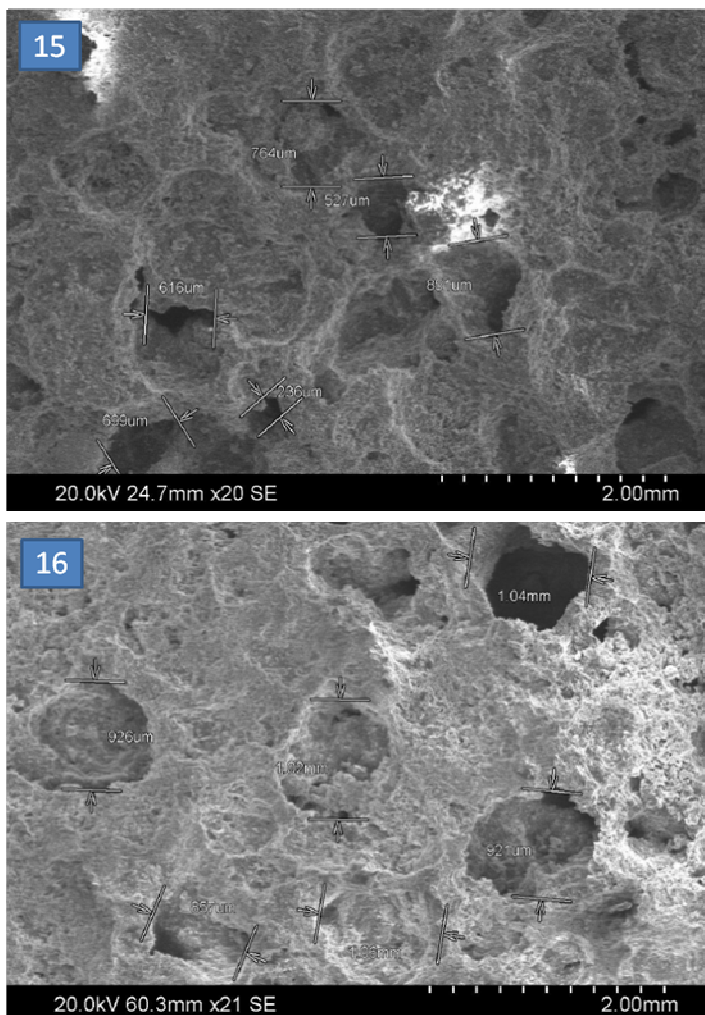


Figura 5.42 – Micrografia (MEV) mostrando a medição de tamanho de poros das amostras 15 e 16. Na amostra 15, tamanhos de poros de 236 a 851 μm . Na amostra 16, tamanhos de poros de 857 a 1060 μm .

A tabela 10 contém informações sobre os percentuais em massa dos componentes químicos presentes em cada amostra e os valores mínimo e máximo de tamanhos de poros encontrados em cada amostra do DOE2. Todos os componentes químicos observados nas amostras eram esperados. Os valores de tamanhos de poros encontrados estão

coerentes com os resultados obtidos DOE2. As amostras 1, 2, 3, 4, 9, 10, 11 e 12, todas com o percentual de alumínio no nível menos (-) do experimento, apresentam os menores tamanhos de poros. O inverso acontece com as amostras 5, 6, 7, 8, 13, 14, 15 e 16, as quais apresentam maiores valores de tamanho de poros.

Tabela 10 – Média dos percentuais em massa de cada componente químico encontrado e valores mínimo e máximo de tamanhos de poros em μm de cada amostra obtida no DOE2

componente químico	O (%massa)	Al (%massa)	Si (%massa)	Ca (%massa)	valores mínimo e máximo de poros (μm)
Amostra					
1	43,3	1,2	25,2	27,9	274 - 588
2	46,7	1,4	21,8	24,0	113 - 385
3	44,9	1,0	23,5	28,5	171 - 488
4	52,6	1,4	13,1	29,9	167 - 759
5	46,2	1,7	21,2	29,2	118 - 904
6	46,1	1,7	18,9	30,0	511 - 1500
7	48,0	1,3	18,9	30,5	119 - 853
8	42,8	1,3	12,3	40,7	690 - 1800
9	46,9	1,6	27,6	20,5	266 - 1260
10	47,4	1,4	25,2	24,7	247 - 895
11	47,9	1,2	21,7	26,6	320 - 1260
12	46,0	1,4	18,7	30,8	217 - 798
13	48,6	1,8	28,8	19,8	255 - 866
14	48,7	1,4	25,5	22,8	373 - 659
15	43,9	1,4	18,5	32,6	236 - 851
16	48,2	1,2	15,7	31,7	857 - 1060

Analisando as imagens obtidas no MEV e os valores de tamanho de poros apresentados na tabela 10, é possível afirmar que os tamanhos de poros obtidos não são direcionados pela quantidade de alumínio utilizado para a formação de bolhas. Esta quantidade de agente formador de bolhas faz com que um número maior de células seja gerado, aumentando a sua distribuição na matriz sólida, modificando sua densidade, condutividade térmica e resistência mecânica.

5.3.7 Porosidade

A tabela 11 apresenta os valores de densidade do sólido que compõe a matriz do concreto celular, densidade aparente, densidade relativa e porosidade das amostras obtidas no DOE2. É possível afirmar que as amostras que apresentam as menores densidades aparentes, apresentam os maiores valores de porosidade.

A figura 5.43 ilustra os valores de densidade aparente e de porosidade obtidas nas amostras retiradas no DOE2. Pode-se afirmar que ambas as curvas possuem um comportamento muito semelhante, validando a teoria de que as amostras com maior densidade aparente possuem os menores valores de porosidade e vice-versa. O comportamento das curvas apresentado na figura 5.43 também serve para validar os modelos apresentados nos itens anteriores (densidade *versus* resistência à compressão e densidade *versus* coeficiente de condutividade térmica).

Tabela 11 – Densidade do sólido, densidade aparente, densidade relativa e porosidade das amostras obtidas no DOE2

Amostra	Densidade do sólido (g/cm³)	Densidade aparente (g/cm³)	Densidade relativa (%)	Porosidade (%)
1	2,54	0,602	23,71%	76,29%
2	2,51	0,712	28,38%	71,62%
3	2,49	0,771	30,97%	69,03%
4	2,44	0,673	27,57%	72,43%
5	2,52	0,361	14,31%	85,69%
6	2,47	0,394	15,94%	84,06%
7	2,43	0,385	15,86%	84,14%
8	2,45	0,429	17,53%	82,47%
9	2,50	0,617	24,68%	75,32%
10	2,48	0,589	23,76%	76,24%
11	2,46	0,480	19,50%	80,50%
12	2,49	0,627	25,19%	74,81%
13	2,59	0,410	15,82%	84,18%
14	2,46	0,408	16,60%	83,40%
15	2,48	0,376	15,18%	84,82%
16	2,45	0,447	18,26%	81,74%

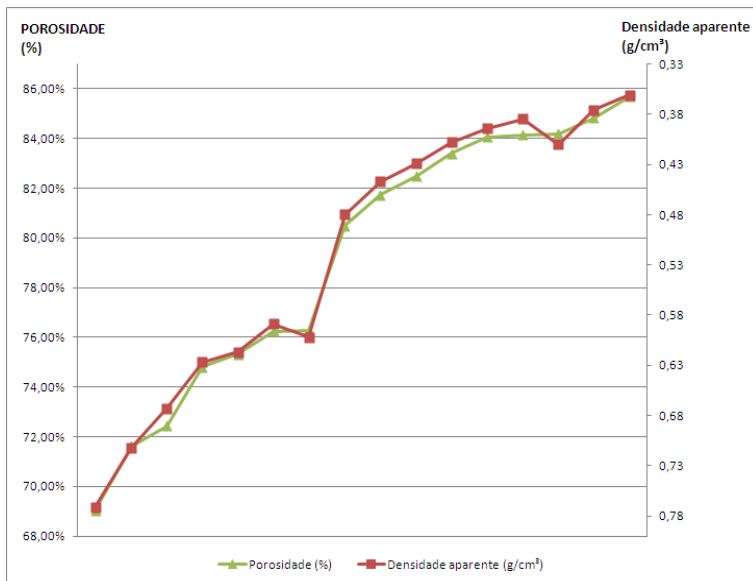


Figura 5.43 – Curvas de porosidade e densidade aparente obtidas no DOE2.

6 CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS

Foram necessários dois experimentos planejados (DOE) para que os objetivos do estudo fossem alcançados. No segundo experimento planejado (DOE2), passou-se de um experimento fatorial fracionado 2^{4-1} para um experimento fatorial completo, aumentando a resolução da resposta. Além disso, os níveis dos fatores foram reavaliados e redefinidos, baseados no conhecimento dos especialistas da fábrica de concreto celular autoclavado. Como saídas deste segundo experimento, é possível afirmar que o componente alumínio em pó é o fator mais significativo para modificações nas características mecânicas (densidade e compressão) e na característica de condutividade térmica. O fator %Al é responsável por 79% da variação gerada na variável resposta densidade, 67% da variação gerada na variável resposta resistência a compressão mecânica e por 72% da variação gerada na variável resposta condutividade térmica. Outras informações obtidas na análise dos dados do DOE2 foram as equações que descrevem as relações entre as variáveis respostas do experimento (densidade, resistência a compressão mecânica e coeficiente de condutividade térmica). O modelo que relaciona densidade e condutividade térmica foi o que apresentou os valores de R^2 e F maiores, evidenciando ser o melhor modelo gerado neste trabalho. Já os outros dois modelos, da relação entre densidade e resistência à compressão mecânica e da relação entre condutividade térmica e resistência à compressão mecânica, foram obtidos valores aceitáveis de R^2 e F. Uma constatação durante os experimentos é que os ruídos durante o ensaio de compressão mecânica são maiores que os presentes nas medições de densidade e de condutividade térmica. Como exemplo de ruídos durante o teste de compressão mecânica podem-se citar:

- Paralelismos entre as faces do cubo a ser testado
- Processo de fixação da amostra no equipamento
- Trincas geradas na peça durante transporte

Este trabalho estudou a importância dos fatores relacionados à matéria prima para as características mecânicas e térmicas finais do concreto celular. Como continuidade desta pesquisa, seria interessante o estudo das variáveis inerentes ao processo de produção do CCA, como por exemplo:

- Parâmetros de mistura (tempo, temperatura, velocidade)

- Parâmetros de autoclavagem (temperatura, tempo, pressão)
- Parâmetros relacionados à matéria prima durante a mistura e vazamento desta no molde (alcalinidade e reologia)

Um estudo mais avançado, na área de concreto celular, seria o estudo dos parâmetros que controlam o crescimento das células no concreto celular. Com tais fatores conhecidos e devidamente controlados, seria possível, por exemplo, gerar zonas com porosidades diferentes e, até mesmo, gerar um concreto celular com células abertas, o que aumentaria o número de alternativas de uso para este material.

7 REFERÊNCIAS

- [1] SCHEFFLER, M.; COLOMBO, P. (Eds.). **Cellular Ceramics: Structure, Manufacturing, Properties and Applications**. Ed. Wiley-VCH. Weinheim, Alemanha. 2005.
- [2] TOOLBASE SERVICES. **Autoclaved Aerated Concrete (AAC):** Manufactured Building Block made of all-natural raw materials. Disponível em: <<http://www.toolbase.org/TechInventory/techDetails.aspx?ContentDetailID=690>>. Acesso em: 10 jun. 2011.
- [3] TIKALSKY, P. J.; POSPISIL, J.; MACDONALD, W. A method for assessment of the freeze–thaw resistance of preformed foam cellular concrete. **Cement And Concrete Research**, 34, p.889-893, 2004. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 11 jun. 2011.
- [4] LAVALLE, S. **Cellular Concrete to the Rescue**. Disponível em: <www.cellular-concrete.com>. Acesso em: 10 jun. 2011.
- [5] NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K. Microstructural investigations on aerated concrete. **Cement and Concrete Research**, v. 30, p.457-464, 1999. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 11 jun. 2011.
- [6] EMERGING CONSTRUCTION TECHNOLOGIES. **Autoclaved Aerated Concrete**. Disponível em: <<http://cobweb.ecn.purdue.edu/ECT/Civil/autoclaved.htm>>. Acesso em: 11 jun. 2011.
- [7] SCHIERHORN, C. **Is the USA ready for Cellular Concrete Block?** Disponível em: <<http://www.cellular-concrete.com/>>. Acesso em: 12 jun. 2011.
- [8] BENAZZOUK, A.; DOUZANE, O.; MEZREB, M.; QUÉNEUDEC, M. Physico-mechanical properties of aerated cement composites containing shredded rubber waste. **Cement And Concrete Composites**, v. 28, p.650-657, 2006. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 12 jun. 2011.
- [9] NARAYANAN, N.; RAMAMURTHY, K.. Structure and properties of aerated concrete: a review. **Cement And Concrete Composites**, v. 22, p.321-329, 2000. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 12 jun. 2011.
- [10] GOUAL, M.S.; BALI, A.; BARQUIN, F.; DHEILLY, R.M.; QUÉNEUDEC, M. Isothermal moisture properties of Clayey Cellular Concretes elaborated from clayey waste, cement and aluminium powder. **Cement And Concrete Research**, v. 36,

- p.1768-1776, 2006. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 12 jun. 2011.
- [11] THE ABERDEEN GROUP. **Cellular Concrete**. Disponível em: <www.cellular-concrete.com>. Acesso em: 12 jun. 2011
- [12] RAMACHANDRAN, V.S. **Concrete Admixtures Handbook: Properties, Science and Technology**. Ed. William Andrew Inc. 1995.
- [13] WHEELER, D. J.; CHAMBERS, D. S. **Understanding Statistical Process Control**. 2^a ed. Ed. SPC Press. 1992.
- [14] MONTGOMERY, D. C.; RUNGER, G. C. **Applied Statistics and Probability for Engineers**. 3^a ed. Ed. John Wiley and Sons, Inc. 2003
- [15] LAZIC, Z. R.; **Design of Experiments in Chemical Engineering**. Ed. Wiley-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA. 2004.
- [16] ANTONY, J. **Design of Experiments for Engineers and Scientists**. Ed. Elsevier Science & Technology Books. 2003
- [17] ABNT NBR 13440/1995. **Blocos de Concreto Celular Autoclavado – Verificação da Densidade de Massa Aparente Seca**
- [18] ABNT NBR 13439/1995. **Blocos de Concreto Celular Autoclavado – Verificação da Resistência à Compressão**.
- [19] ARONI, S.; DE GROOT, G.J.; ROBINSON, M.J.; SVANHOLM, G.; WITTMAN, F.H. (Eds.), **Autoclaved Aerated Concrete, Properties, Testing and Design, RILEM Recommended Practice**, RILEM Technical Committees 78-MCA and 51-ALC, E & FN Spon, London 1993, 404 pp.
- [20] POSPISIL F.; JAMBOR J.; BELKO, J. **Unit weight reduction of fly ash aerated concrete**. Wittmann FH, editor. Advances in Autoclaved Aerated Concrete. A.A. Balkema, 1992. p. 43±52.
- [21] CEB Manual of design and technology. Autoclaved aerated concrete. The Construction Press, 1977
- [22] VALORE, R.C. **Cellular concretes-physical properties**. J Am ConcrInst 1954;25:817±36.
- [23] RUDNAI, G. **Light weight concretes**. Budapest: Akademi Kiado, 1963
- [24] ACI Committee 523. Guide for cellular concretes above 50 pcf, and for aggregate concretes above 50 pcf with compressive strengths less than 2500 psi. J Am Concr Inst. 72:50±66.
- [25] LEGATSKI, L.A. **Cellular concrete, significance of tests and properties of concrete and concrete making materials**. Klieger

- PK, Lamond JF, editors. ASTM Special Technical Publication. Philadelphia, No. 169C. p. 533±9
- [26] MITSUDA, T.; SASAKI, K.; ISHIDA, H., J. Am. **Ceram. Soc.**, 75 1858 (1992).
- [27] MITSUDA, T.; SASAKI, K.; ISHIDA, H., J. **Advances in Autoclaved Aerated Concrete**, p. 11, Edited by F. H. Wittmann. Balkema, Rotterdam, Netherlands (1992).
- [28] CRENNAN, J. M.; DYCZEK, J.R.L.; TAYLOR, H. F. W. **Cem. Concr. Res.**, 2, 277 (1972).
- [29] ISU, N.; ISHIDA, H.; MITSUDA, T. Influence of Quartz Particle Size on the Chemical and Mechanical Properties of Autoclaved Aerated Concrete (I) Tobermorite Formation. **Cement and Concrete Research**, 25, No 2, pp. 243-248, 1995. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 20 ago. 2011.
- [30] VISAGIE M, KEARSELY EP. **Properties of foamed concrete as influenced by air-void parameters**. Concrete/Beton 2002;101:8–14.
- [31] RAMAMURTHY, K.; NAMBIAR, E.K.K.; RANJANI, I.S. A Classification of Studies on Properties of Foam Concrete. **Cement & Concrete Composites**, 31, No 9, pp. 388-396, 2009. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 20 ago. 2011.
- [32] HOFF, G.C. Porosity-strength Considerations for Cellular Concrete. **Cement and Concrete Research**, 2, No 1, pp. 91–100, 1972. Disponível em: <www.sciencedirect.com>. Acesso em: 20 ago. 2011.
- [33] INCROPERA, F.P; DEWITT, D.P; BERGMAN, T.L; LAVINE, A.S. **Fundamentos de Transferência de Calor e Massa**, 6ª edição, LTC, Rio de Janeiro. 2008..
- [33] GIBSON, L. J.; ASHBY, M. F. **Cellular Solids – Structure and Properties**. 2ª ed. Ed. Cambridge University Press. Cambridge, Reino Unido. 2001.
- [34] GHOSH, S.; RAO, C.R. **Handbook of Statistics**, 13, Elsevier Science B.V., 1996